
DIPLOMARBEIT

Herr
Ing. Jürgen Purner

**Schweißprozessevaluierung:
Zeit- und Kostenreduktion
mittels moderner Schweiß-
verfahren**

2017

DIPLOMARBEIT

Schweißprozessevaluierung: Zeit- und Kostenreduktion mittels moderner Schweiß- verfahren

Autor/in:

Herr Ing. Jürgen Purner

Studiengang:

WI

Seminargruppe:

KW10wSA

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. oec. Volker Tolkmitt

Zweitprüfer:

Prof. Dr. Andreas Hollidt

Bibliografische Angaben

Ing. Purner, Jürgen, EWE/IWE

Schweißprozessevaluierung: Zeit- und Kostenreduktion mittels moderner Schweißverfahren

125 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen, Diplomarbeit, 2017

Abstract

Ziel der Diplomarbeit ist es, zwei Hochleistungsschweißprozesse hinsichtlich der unterschiedlichen Prozessanforderungen, Machbarkeit, Reproduzierbarkeit und Wirtschaftlichkeit mit einem im Stahl- und Metallbau gängigem Schweißprozess zu vergleichen. Gleichzeitig beinhaltet der Vergleich eine Variante des herkömmlichen Prozesses mit veränderten Parametereinstellungen um Optimierungspotenziale ausfindig zu machen. Im theoretischen Teil wird auf die metallurgischen Grundlagen, die Rahmenbedingungen, die Schweißprozesse mit deren normativen Grundlagen, und die Prozessanforderungen eingegangen. Die Werte für die Vergleichbarkeit werden aus empirischen Testreihen ermittelt und daraus Statistiken erstellt. Anschließend wird daraus die Wirtschaftlichkeit errechnet und ein Schlusswort abgeleitet.

Danksagung

Mein herzlichster Dank gilt allen, die zum Gelingen der Diplomarbeit beigetragen haben.

Insbesondere danke ich Herrn Prof. Dr. rer. oec. Volker Tolkmitt und Herrn Prof. Dr. Andreas Hollidt für die hervorragende Betreuung. Mein Dank gilt ebenso Herrn Dipl. Wirtsch. Ing. Christian Hayjek, EWE/IWE für die Beantwortung von Fragen im metallurgischen Bereich und Herrn Ing. Sarija Mehmedovic, EWE/IWE für die Unterstützung bei der Durchführung der Testreihen.

Besonderer Dank gilt auch meiner Frau Natia Purner-Janjalashvili, BA. für die unendliche Geduld und Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Formelverzeichnis.....	IX
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Eisenwerkstoffe... ..	3
2.1 Einteilung der Eisenwerkstoffe allgemein	3
2.1.1 Bezeichnungssystem für Stähle.....	4
2.1.2 Einteilung der Stähle nach Kurznamen.....	4
2.1.3 Einteilung der Stähle nach Werkstoffnummern	10
2.1.4 Einteilung der Stähle nach Zusammensetzung und Güteklassen	13
2.1.5 Stahlsorten und ihre Verwendung.....	15
2.1.6 Handelsformen der Stähle	15
2.1.7 Legierungselemente der Stähle	16
2.1.8 Begleitelemente der Stähle.....	16
2.2 Wärmebehandlung der Stähle.....	16
2.2.1 Gefügearten der Eisenwerkstoffe	17
2.2.2 Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm	19
2.2.3 Glühen.....	21
2.2.4 Härten	23
2.2.5 Vergüten.....	28
3 Grundlagen für das Schweißen von Eisenwerkstoffen... ..	34
3.1 Entwicklung des Metallschweißverfahrens	34
3.2 Einteilung der Schweißverfahren.....	35
3.2.1 Einteilung nach Art des Energieträgers.....	36
3.2.2 Einteilung nach Art des Grundwerkstoffes	36
3.2.3 Einteilung nach Zweck des Schweißens.....	36
3.2.4 Einteilung nach Ablauf des Schweißens	38

3.2.5 Einteilung nach Art der Fertigung	38
3.3 Schweißbarkeit.....	39
3.3.1 Schweißeignung	40
3.3.2 Schweißmöglichkeit.....	44
3.3.3 Schweißsicherheit	45
3.3.4 Abschließende Betrachtung zur Schweißbarkeit.....	46
3.4 Schweißhauptpositionen und Schweißnahtformen	46
3.4.1 Schweißnahtpositionen	46
3.4.2 Schweißnahtarten.....	49
3.5 Schweißgase.....	49
3.5.1 Einteilung und Bezeichnung der Gase.....	49
3.5.2 Mischgenauigkeit und Reinheit der Gase	51
3.5.3 Eigenschaften der Gase im Schweißprozess.....	51
3.6 Evaluierte Schmelzschweißverfahren.....	53
3.6.1 Metallaktivgasschweißen.....	54
3.6.2 MSG-Hochleistungsschweißen mit Eindraht (TIME)	56
3.6.3 Unterpulverschweißen.....	58
4 Systematik der evaluierten Schweißverfahren.....	62
4.1 Konventionelles MAG-Schweißgerät und seine Prozeßeinflüsse.....	62
4.2 HL-MAG-Schweißgerät und seine Prozeßeinflüsse	68
4.3 UP-Schweißgerät und seine Prozeßeinflüsse.....	73
4.4 Testreihen und Gegenüberstellungen.....	80
5 Wirtschaftlichkeit der evaluierten Schweißverfahren.....	86
5.1 Kostenproduzierende Faktoren	87
5.1.1 Faktoren für Kehlnähte	88
5.1.2 Faktoren für V-Nähte	89
5.2 Prozeßevalierung	90
6 Zusammenfassung und Ausblick... ..	97
Literaturverzeichnis	XV
Anlagen.....	XX

Eigenständigkeitserklärung	XXVII
---	--------------

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
HL - Schweißverfahren ...	Hochleistungsschweißverfahren
UP – Schweißverfahren ..	Unterpulverschweißverfahren
ppmw	parts per million by weight (= Teile pro Million nach Gewicht)
d.h.	das heißt
α - MK	Alpha - Mischkristall (Ferrit)
γ - MK	Gamma – Mischkristall (Austenit)
ZTA	Zeit – Temperatur – Austenitisierung (Schaubild)
ZTU	Zeit – Temperatur – Umwandlung (Schaubild)
KLB	Kurzlichtbogen
ÜLB	Übergangslichtbogen
SLB	Sprühlichtbogen
RLB	rotierender Lichtbogen
Krz.	kubisch raumzentriert
Kfz.	kubisch flächenzentriert
WEZ	Wärmeeinflusszone
Wurz	Wurzellage
Zw.L.	Zwischenlage
Deck.	Decklage
ZWS	Zusatzwerkstoff
kWh	Kilowattstunde
CEV	Kohlenstoffäquivalent
IIW	International Institute of Welding

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung von 100% Zementit Fe_3C im Stahl.....	19
Formel 2: CEV nach EN10025-2	33
Formel 3: Kohlenstoffäquivalent nach dem IIW	33
Formel 4: Schweißgasberechnung	66
Formel 5: tatsächliche Schweißnahtlänge	88
Formel 6: tatsächliche Abschmelzleistung pro Stunde.....	88
Formel 7: tatsächliche Abschmelzleistung pro Stunde (alternativ)	88
Formel 8: tatsächlicher Gasverbrauch pro Stunde.....	88
Formel 9: tatsächlicher Pulververbrauch	88
Formel 10: tatsächlicher Strombedarf.....	90
Formel 11: Stromkosten bezogen auf Meter Schweißnaht	90
Formel 12: Gaskosten bezogen auf Meter Schweißnaht	91
Formel 13: Zusatzwerkstoffkosten bezogen auf Meter Schweißnaht	91
Formel 14: Schweißerkosten bezogen auf Meter Schweißnaht	91
Formel 15: Zuarbeitskosten bezogen auf Meter Schweißnaht	91
Formel 16: Gesamtkosten bezogen auf Meter Schweißnaht	91

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einteilung der Eisenwerkstoffe	3
Abb. 2: Nummernsystem der DIN 17007	10
Abb. 3: Nummernsystem für Stahl nach EN 10027.....	11
Abb. 4: Stahleinteilung nach Verwendungszweck	15
Abb. 5: Ferritgefüge.....	17
Abb. 6: Ferrit-Perlit-Gefüge mit 0,45% C	17
Abb. 7: Perlit-Gefüge mit 0,8% C.....	18
Abb. 8: metastabiles Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm	19
Abb. 9: Gefügeumwandlung α und γ -Eisen bei Erwärmung.....	20
Abb. 10: Temperaturführung verschiedener Glühverfahren	21
Abb. 11: C45 in normalgeglühtem Zustand	25
Abb. 12: Temperaturverlauf und ZTU-Schaubild bei langsamer Abkühlung.....	25
Abb. 13: C45 im gehärteten Zustand.....	25
Abb. 14: Temperaturverlauf und ZTU-Schaubild beim Härten	26
Abb. 15: kombiniertes ZTA- und ZTU-Schaubild eines C45.....	27
Abb. 16: Schweißnaht mit WEZ.....	28
Abb. 17: C45 im vergüteten Zustand	28
Abb. 18: Vergütungsschaubild des Stahls C45.....	30
Abb. 19: Gefüge nach dem Härten und Anlassen.....	31
Abb. 20: Schweißbarkeit des Werkstoffes nach DIN 8528-1	40
Abb. 21: Einflussmöglichkeiten auf fertigungsbedingte Schweißmöglichkeit.....	44
Abb. 22: Einflussgrößen auf die Schweißsicherheit	45
Abb. 23: Wannenposition (PA)	46
Abb. 24: Horizontal- /Vertikalposition (PB).....	47
Abb. 25: Horizontalposition (PC)	47
Abb. 26: Horizontal- /Überkopfposition (PD).....	47
Abb. 27: Überkopfposition (PE)	48
Abb. 28: Steigposition (PF).....	48
Abb. 29: Fallposition (PG)	48

Abb. 30: Übersicht Verbindungsschmelzschweißarten	53
Abb. 31: Unterteilung des Schutzgasschweißens	54
Abb. 32: Schutzgasschweißanlage	55
Abb. 33: Stick-Out beim TIME-Schweißen	56
Abb. 34: Definition MSG-Hochleistungsschweißen	57
Abb. 35: Zugehörigkeit des UP-Schweißens	58
Abb. 36: Schematische Darstellung der UP-Schweißung	59
Abb. 37: TransSteel 3500	62
Abb. 38: Schweißbrenner MTG 3500S	62
Abb. 39: Zusammenhang Stick-Out-Einbrandtiefe	63
Abb. 40: wichtige Kehlnahtabmessungen	64
Abb. 41: Schliffbild einer Kehlnaht	64
Abb. 42: wichtige Abmessungen einer V-Naht beim MAG-Schweißen	64
Abb. 43: Schliffbild einer V-Naht	64
Abb. 44: saubere Brennerdüse	65
Abb. 45: schmutzige Brennerdüse	65
Abb. 46: Gaswirbel bei einer 13mm Düse	66
Abb. 47: Magnetische Wirkung auf den Gasstrahl	66
Abb. 48: Sauerstoffkonzentration in der Düsenumgebung	67
Abb. 49: TIME 5000 Digital	68
Abb. 50: Schweißbrenner TIME W	68
Abb. 51: Zusammenhang Stick-Out zu Stromstärke	69
Abb. 52: Sprühlichtbogen (links) und Rotationslichtbogen (rechts)	69
Abb. 53: Arbeitsbereiche unterschiedlicher Lichtbögen	71
Abb. 54: wichtige Abmessungen der V-Naht beim HL-MAG-Verfahren	72
Abb. 55: ESAB A2 Multi Trac	73
Abb. 56: Makroschliff einer UP-Schweißung mit halbkreisförmiger Unterraupen	74
Abb. 57: Einfluss der Stromstärke auf die Nahtausbildung	75
Abb. 58: Einfluss der Stromstärke auf Nahtbreite, -tiefe und -überhöhung	75

Abb. 59: Abschmelzleistung in Abhängigkeit von Drahtdurchmesser und der Stromstärke.....	76
Abb. 60: Darstellung der Nahtform entsprechend der Abbildung 61	77
Abb. 61: Einfluss der Lichtbogenspannung auf die Schweißnahtform	77
Abb. 62: Schweißnahtbreite, -höhe und –tiefe in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit	78
Abb. 63: wichtige Abmessungen der V-Naht beim UP-Schweißen	79
Abb. 64: Gesamtkostenvergleich pro Meter Schweißnaht bei Kehlnähten.....	95
Abb. 65: Gesamtkostenvergleich pro Meter Schweißnaht bei V-Nähten.....	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennbuchstaben nach Verwendungszweck nach EN 10027-1	4
Tabelle 2: Eigenschaftsangaben für die Kerbschlagarbeit nach EN 10027-1.....	5
Tabelle 3: Eigenschaftsangaben nach EN 10027-1	5
Tabelle 4: Zusatzsymbole der Gruppe 1 nach EN 10027-1	6
Tabelle 5: Kennbuchstaben nach chem. Zusammensetzung nach EN 10027-1	6
Tabelle 6: Zusatzsymbole der Gruppe 2 für unlegierte Stähle nach EN 10027-1.....	7
Tabelle 7: Faktoren für Legierungselemente nach EN 10083.....	8
Tabelle 8: Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse – Teil 1 (Auswahl)	9
Tabelle 9: Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse – Teil 2 (Auswahl)	10
Tabelle 10: Rahmenplan für Werkstoffhauptgruppen nach DIN 17007	11
Tabelle 11: Stahlgruppennummern für unlegierte Qualitätsstähle nach EN 10027-2 ...	11
Tabelle 12: Stahlgruppennummern für unlegierte Edelstähle nach EN 10027-2	12
Tabelle 13: Stahlgruppennummern für legierte Stähle nach EN 10027-2	12
Tabelle 14: Grenzwerte der Legierungselemente für unlegierte Stähle nach EN 10020	13
Tabelle 15: Grenzwerte zwischen Qualitäts- und Edelstähle schweißgeeigneter Feinkornbaustähle nach EN10020	14
Tabelle 16: Wärmebehandlungstemperaturen einiger Vergütungsstähle in °C	31
Tabelle 17: Maximalwerte S355J2+N lt. Hersteller	33
Tabelle 18: Ordnungsnummern für Schweißverfahren nach EN 4063 (Auszug)	35
Tabelle 19: Einteilung der Schweißverfahren	36
Tabelle 20: Reinheit und Feuchte der Gase nach EN ISO 14175	51
Tabelle 21: Eigenschaften unterschiedlicher Schweißgase	52
Tabelle 22: Eigenschaften von UP-Pulver	61
Tabelle 23: theoretische Abmessungen von Kehlnähten	64
Tabelle 24: Nahtgeometrie bei V-Nähten für das MAG-Verfahren	65
Tabelle 25: Nahtgeometrie bei V-Nähten für das HL-MAG-Verfahren	72
Tabelle 26: Schweißnaht- und Kavernenausbildungen am Beispiel der Elektrode Böhler EMS 2	74

Tabelle 27: Abhängigkeit der Stromstärke vom Drahtdurchmesser	76
Tabelle 28: Fugenformen für das UP-Schweißen nach EN 9692-2.....	79
Tabelle 29: Nahtgeometrie bei V-Nähte für das UP-Verfahren	80
Tabelle 30: Einstelldaten der Fa. Oerlikon für Kehlnähte.....	80
Tabelle 31: Einstelldaten der Fa. Oerlikon für V-Nähte.....	81
Tabelle 32: Schweißdaten für Kehlnähte mit konv. MAG-Gerät.....	82
Tabelle 33: Schweißdaten für V-Nähte mit konv. MAG-Gerät.....	82
Tabelle 34: Schweißdaten für Kehlnähte mit HL-MAG-Gerät.....	83
Tabelle 35: Schweißdaten für V-Nähte mit HL-MAG-Gerät.....	84
Tabelle 36: Schweißdaten für Kehlnähte mit UP-Gerät	85
Tabelle 37: Schweißdaten für V-Nähte mit UP-Gerät	85
Tabelle 38: Kosten der unbeeinflussbaren Faktoren.....	87
Tabelle 39: Vergleichswerte für die Kehlnähte a=6mm.....	88
Tabelle 40: Vergleichswerte für die Kehlnähte a=7mm.....	89
Tabelle 41: Vergleichswerte für die Kehlnähte a=8mm.....	89
Tabelle 42: Vergleichswerte für die V-Nähte bei 6mm Blechdicke	89
Tabelle 43: Vergleichswerte für die V-Nähte bei 8mm Blechdicke	90
Tabelle 44: Vergleichswerte für die V-Nähte bei 10mm Blechdicke	90
Tabelle 45: Kostenvergleich bei einer Kehlnaht a=6mm.....	91
Tabelle 46: Kostenvergleich bei einer Kehlnaht a=7mm.....	92
Tabelle 47: Kostenvergleich bei einer Kehlnaht a=8mm.....	92
Tabelle 48: Kostenvergleich bei einer V-Naht, Blechdicke 6mm	93
Tabelle 49: Kostenvergleich bei einer V-Naht, Blechdicke 8mm.....	94
Tabelle 50: Kostenvergleich bei einer V-Naht, Blechdicke 10mm.....	94
Tabelle 51: Kostenersparnis bei Kehlnähten in %	95
Tabelle 52: Kostenersparnis bei V-Nähten in %	96

1. Einleitung

Eisen ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Fe (Latein: *ferrum* ‚Eisen‘) und der Ordnungszahl 26. Es zählt zu den Übergangsmetallen und befindet sich im Periodensystem in der achten Nebengruppe, der sogenannten Eisen-Gruppe. Es ist, bezogen auf den Massenanteil (ppmw), nach Sauerstoff, Silizium und Aluminium das vierthäufigste Element in der Erdkruste und nach Aluminium das zweithäufigste Metall.¹

Der Beginn der Eisenverwendung reicht etwa 5000 Jahre zurück. Bei den ersten Bearbeitungs- und Verwendungsversuchen handelte es sich um extraterrestrisches Eisen von Meteoriten, und wurde zur Schmuckherstellung z.B. für Halsketten benutzt.²

Dieses sogenannte Meteoriteisen enthält eine sehr hohe Eisen- und Nickelkonzentration, meist in Form des nickelarmen Kamazit (weniger als 6% Nickel) und des nickelreichen Taenit (zwischen 6 und 15% Nickel).³

In der Literatur gehen die Meinungen bezüglich der anfänglichen Verarbeitung von Meteoriteisen deutlich auseinander. Einerseits werden Bearbeitungsmethoden der Steinbearbeitung, wie z.B. Bohren, Hämmern, Sägen bzw. durch Schleifen und Polieren mit Hilfe spezieller Schmirgelstoffe wie z.B. Quarzsand oder Korund zur Formgebung des Eisens angeführt.⁴

Andererseits geht man davon aus, dass bereits bekannte Metallgewinnungsmethoden für Kupfer und Gold in weiterer Folge bei der Eisengewinnung übernommen und weiterentwickelt wurden. Der Schmelzpunkt des Meteoriteisens (niedrigster Schmelzpunkt von Eisen-Nickel-Legierung bei 66% Eisen: 1440°C, siehe Anhang 1: Eisen-Nickel-Phasendiagramm) konnte zu dieser Zeit noch nicht erreicht werden.

Verhüttetes Eisen (unterscheidet sich vom Meteoriteisen durch das Fehlen von Nickel) wurde erstmals aus der Zeit zwischen 3000 und 2000 v. Chr. in Mesopotamien (Bereich im heutigen Syrien und Irak zwischen dem Tigris und dem Euphrat ca. 2360 bis 2150 v. Chr.), in Kleinasien bzw. dem Gebiet zwischen Anatolien, Armenien und dem vorderen Kaukasus, Ägypten und dem Gebiet des heutigen Sudan gefunden.⁵

¹ http://www.unitererra.de/rutherford/tab_hauf.htm, Stand 27.11.2016

² <http://derstandard.at/1376533962878/Aelteste-Eisen-Artefakte-sind-extraterrestrischen-Ursprungs>, Veröffentlichung vom 20. August 2013, Stand 27.11.2016

³ Matthes S. Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, 1996, S. 21

⁴ Maier, Ott, Sauer, Materiale Textkulturen: Konzepte – Materialien - Praktiken, S. 255

⁵ <http://www.formteile.ch/eisen.php#Geschichte>, Stand: 10.10.2017

Ab 1200 fand im Nahen Osten der Übergang von der Bronzezeit zur Eisenzeit statt. Es wird vermutet, dass nicht die Materialüberlegenheit des Eisens, sondern ein Mangel an Zinn (zur Bronzeherstellung notwendig) den Übergang auslöste.⁶

Die Entwicklung der Eisenerzeugung brachte unterschiedliche Ofenformen hervor, wie z.B. den Rennofen, den Stückofen, den Floß- oder Holzkohleofen, den Kokshochofen, die Direktreduktionsanlage und die Schmelzreduktionsanlage.

Der Rennofen war ein niedriger Gruben- oder Schachtofen der meist aus Lehm, Bruchsteinen und anderen Findlingen bestand. Zu Beginn wurde er mit natürlichem Luftzug, später mit Blasebalge betrieben. Die Rennöfen wurden meist dort aufgebaut, wo Eisenerz gefunden wurde. Das Ergebnis aus dem Ofen waren mit Schlacke durchsetzte Eisenklumpen, auch Luppen genannt, denen durch mehrfaches Erwärmen und Schmieden die Schlacke ausgetrieben wurde.

Im 10. Jahrhundert wurden die Blasebalge bereits mit Wasser angetrieben, die Öfen wurden fest gemauert und die gewonnenen Stahlstücke konnten bereits Einzelgewichte von 100kg betragen. Darauf ist die Bezeichnung „Stückofen“ zurückzuführen.

Im 12. Jahrhundert konnte man durch verbesserte Wärmenutzung bereits den Schmelzpunkt des Eisenerzes erreichen. Das flüssige Eisenerzeugnis führte zu dem Namen Floßofen. Dieses Eisen war anfänglich sehr unbeliebt, wurde auch als „Dreckseisen“ bezeichnet, weil es den Kohlenstoff aus der Holzkohle aufnahm und im festen Zustand nicht mehr schmiedbar war. Es sollte in weiterer Folge gereinigt bzw. „gefrischt“ werden, um es wieder in schmiedbares Stahl umzuwandeln.

Durch zunehmenden Mangel an Holz wurde eine Weiterentwicklung zum Kokshochofen erforderlich. 1709 gelang dies Abraham Darby in England zum ersten Mal.⁷

In der bei niedrigeren Temperaturen arbeitenden Direktreduktionsanlage wird kein flüssiges Eisen erzeugt, sondern dem Erz nur Sauerstoff entzogen. Die Gangartbestandteile verbleiben jedoch im sogenannten Schwammeisen. Es wird im Elektrolichtbogenofen weiterverarbeitet. Die Schmelzreduktionsanlage verarbeitet die Erze zunächst zu Eisenschwamm, wird jedoch mithilfe von Kohle und Sauerstoff annähernd zu Roheisen umgewandelt und wie Roheisen weiterverarbeitet.⁸

⁶ <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Mineralienportrait/Eisen?lang=de&language=german>, Stand 27.11.2016

⁷ Stahlinstitut VDEh (Hrsg.): Stahlfibel, 2007, S. 184ff

⁸ <http://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahltechnologie/stahlerzeugung/>, Stand: 10.10.2017

2. Grundlagen der Eisenwerkstoffe

2.1. Einteilung der Eisenwerkstoffe allgemein

Die Eisenwerkstoffe werden in Stähle (< 2,06% Kohlenstoff-Gehalt) und Eisengusswerkstoffe (> 2,06% Kohlenstoff-Gehalt) unterteilt. Eisen bildet den Hauptbestandteil, zusätzlich können Legierungs- und Begleitelemente Nebenbestandteile sein.

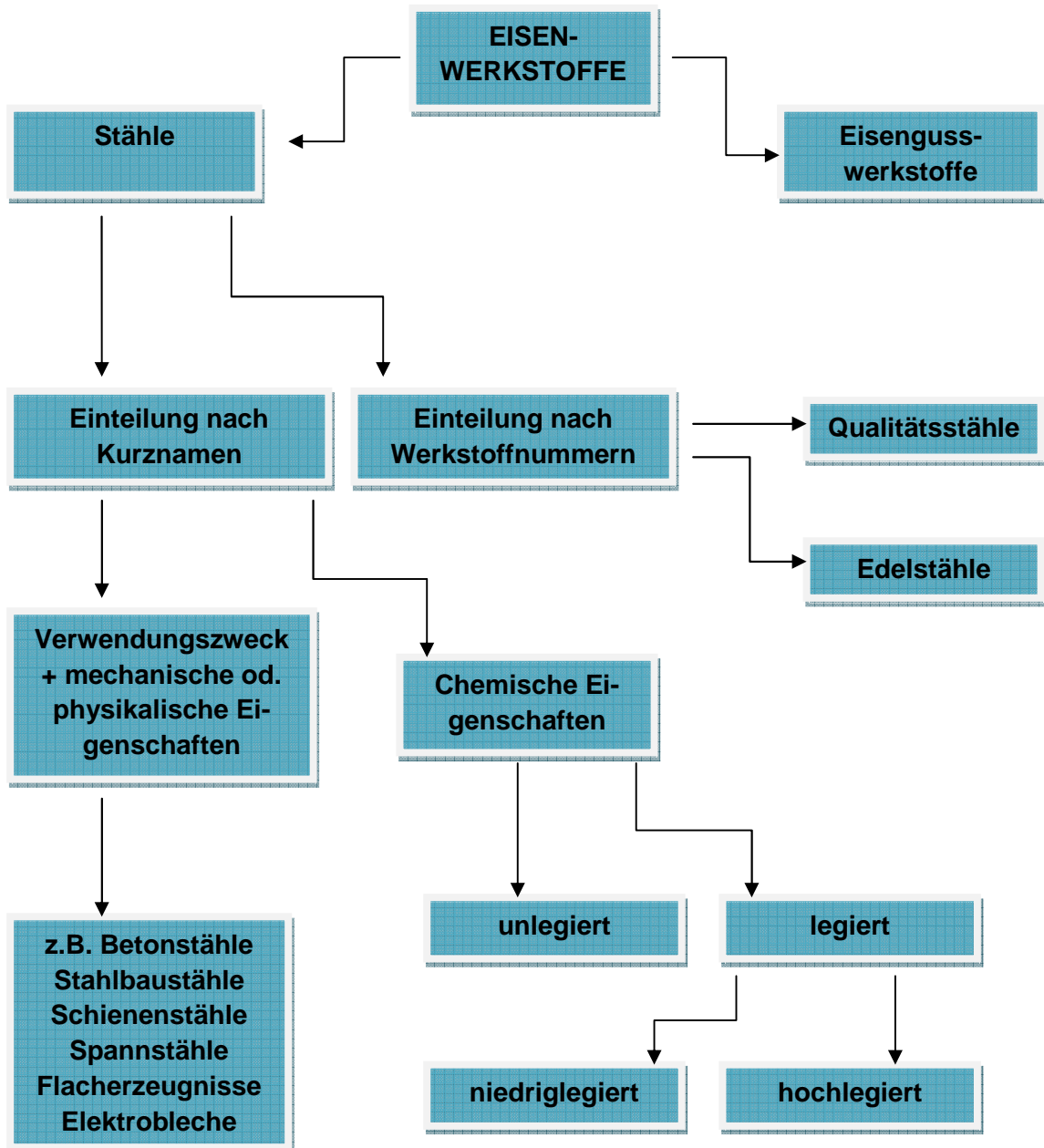


Abbildung 1: Einteilung der Eisenwerkstoffe nach EN 10027

2.1.1. Bezeichnungssystem für Stähle

Die Norm EN 10027 regelt in Europa einheitlich die Bezeichnungssystematik der Stähle. Teil 1 dieser Norm legt den Aufbau der Kurznamen, Teil 2 den Aufbau der Werkstoffnummern fest. Die Kurznamen werden bei den Hauptsymbolen nach dem Verwendungszweck und den Eigenschaften oder nach der chemischen Zusammensetzung der Stähle gebildet.⁹

2.1.2. Einteilung der Stähle nach Kurznamen

- Kurznamen nach mechan. u. physikal. Eigenschaften (Gruppe 1)

Aufbau: Hauptsymbol – Eigenschaftsangabe – Zusatzsymbol

Hauptsymbol	Stahlart (Verwendung)	Eigenschaftsangaben
B	Betonstähle	charakterist. Streckgrenze
D	Flacherzeugnisse zum Kaltumformen	
DC	Kaltgewalzte Flacherzeugnisse	Kennziffer 2-stellig
DD	Warmgewalzte Flacherzeugnisse zum unmittelbaren Kaltumformen	Kennziffer 2-stellig
DX	Art des Walzens (kalt oder warm) nicht vorgeschrieben	Kennziffer 2-stellig
E	Maschinenbaustähle	Mindeststreckgrenze für die kleinste Erzeugnisdicke
G	Stahlguss (wenn erforderlich)	Mindeststreckgrenze
H	kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus höherfesten Stählen zum Kaltumformen	Mindeststreckgrenze
HT	wie H	Mindestzugfestigkeit
L	Stähle für den Leitungsrohre	Mindeststreckgrenze für die kleinste Erzeugnisdicke
M	Elektroblech und -band	höchstzulässige Ummagnetisierungsverluste
P	Stähle für den Druckbehälter	Mindeststreckgrenze für die kleinste Erzeugnisdicke
R	Schienenstähle	Mindestzugfestigkeit
S	Stähle für den allgemeinen Stahlbau	Mindeststreckgrenze für die kleinste Erzeugnisdicke
T	Feinst- und Weißblech und -band	
Y	Spannstähle	

Tabelle 1: Kennbuchstaben nach Verwendungszweck nach EN 10027-1

⁹ Bartenschlager & Co: Fachkunde Metall – Mechanische Technologie, 2014, S. 278

Die Eigenschaftsangaben für den jeweiligen Stahl werden ohne Leerzeichen direkt am Hauptsymbol angehängt (Gruppe 1). Für die Maschinenbaustähle und die Stähle für den Stahlbau sind die Eigenschaftsangaben in zwei Gruppen unterteilt. Die Gruppe 1 enthält Eigenschaftsangaben die Kerbschlagarbeit und die Wärmebehandlung betreffend, sowie die Möglichkeit, besondere Merkmale eingehen zu können.¹⁰

Kerbschlagarbeit			Prüftemperatur
27 Joule	40 Joule	60 Joule	°C
JR	KR	LR	+ 20
J0	K0	L0	0
J2	K2	L2	-20
J4	K4	L4	-40

Tabelle 2: Eigenschaftsangaben nach EN 10027-1 für die Kerbschlagarbeit für Stähle mit Hauptsymbol S und G

Die Gruppe 1 enthält Eigenschaftsangaben besonderer Art oder Eignung abhängig von der jeweiligen Stahlgruppe bzw. Erzeugnisgruppe.

Eigenschaftsangaben Gruppe 1		zu Hauptsymbolen
M	Thermomechanisch gewalzt	S, P, L, H
N	Normalgeglüht oder normalisierend geglüht	S, P, L
Q	vergütet	S, P, L, Y
B	Gasflaschen	P
S	Einfache Druckbehälter	P
T	für Rohre	P, D
C	kaltgezogener Draht	Y
H	warmgezogene oder vorgespannte Stäbe	Y
S	Litze	Y
Mn	hoher Mangengehalt	R
Cr	Chromlegiert	R
B	Bake hardening	H
P	Phosphorlegiert	H
X	Dualphase	H
Y	Interstitial free steel (IF-Stahl)	H
D	Schmelztauchüberzug	D
EK	für funktionelle Emailierung	D
ED	für Direktemailierung	D
H	für Hohlprofile	D
G	für andere Merkmale ggf. mit 1 oder 2 Ziffern	S, P, L, E, Y, R, H, D

Tabelle 3: Eigenschaftsangaben nach EN 10027-1

¹⁰ Brüttsch-Rüegger: Technische Schriftenreihe 09 – Einteilung und Bezeichnung der Stähle, 2001, S. 6

Hauptgruppenabhängig können die Hauptsymbole durch folgende Zusatzsymbole erweitert werden:

Zusatzsymbole Gruppe 2		zu Hauptsymbolen
C	mit besonderer Kaltumformbarkeit	S, E
D	für Schmelzüberzüge	S, H
E	für Emailierung	S
F	zum Schmieden	S
H	Hohlprofile	S, D
H	Hochtemperatur	P
L	für tiefe Temperaturen	P, S
M	Thermomechanisch gewalzt	S
N	Normalgeglüht oder normalisierend gewalzt	S
O	für Offshore	S
P	Spundwandstahl	S
Q	vergütet	S, R
R	Raumtemperatur	P
S	für Schiffsbau	S
T	für Rohre	S
W	Wetterfest	S
X	Hoch- und Tieftemperatur	P

Tabelle 4: Zusatzsymbole der Gruppe 1 nach EN 10027-1

Weitere Zusatzsymbole für die Stahlerzeugnisse (Fertigprodukten) dürfen mit einem Pluszeichen (+) angehängt werden.

- Kurznamen nach der chem. Zusammensetzung (Gruppe 2)

Mit diesen Kurznamen werden nicht nach Verwendung bezeichnete unlegierte Stähle, nichtrostende Stähle und andere legierte Stähle bezeichnet.

Hauptsymbol	Stahlart (Verwendung)	Eigenschaftsangaben
G	Stahlguss (wenn erforderlich)	100x mittlerer C-Gehalt angehängt
C	Kohlenstoffstähle	100x mittlerer C-Gehalt angehängt
X	Legierte Stähle	mittlerer Gehalt mind. eines Legierungselementes angehängt
HS	Schnellarbeitsstähle	Legierungsgehalte angehängt

Tabelle 5: Kennbuchstaben nach chem. Zusammensetzung nach EN 10027-1

Bei der Bildung der Kurznamen nach der chemischen Zusammensetzung wird in vier Untergruppen unterschieden:

- Unlegierte Stähle mit einem Mangangehalt kleiner als 1% (außer Automatenstähle):

Aufbau: Hauptsymbol (Tab. 5) – Eigenschaftsangabe –Zusatzsymbol (Tab. 6)

Symbol	Bedeutung
E	vorgeschriebener max. S-Gehalt
R	vorgeschriebener Bereich des S-Gehalts
D	zum Drahtziehen
C	besondere Kaltumformbarkeit
S	für Federn
U	für Werkzeuge
W	für Schweißdraht
G	andere Merkmale

Tabelle 6: Zusatzsymbole der Gruppe 2 für unlegierte Stähle nach EN 10027-1

Weitere Zusatzsymbole für die Stahlerzeugnisse werden mit dem Pluszeichen angehängt:

Beispiel:

C70D ist ein unlegierter Stahl (C) mit einem Mangangehalt $< 1\%$, einem C-Gehalt von $70:100 = 0,70\%$ und einem empfohlenen Verwendungszweck (Drahtziehen). Er wird wegen seines C-Gehalts als Vergütungsstahl verwendet.

- Unlegierte Stähle mit einem Mangangehalt $\geq 1\%$, Automatenstähle sowie legierte Stähle, sofern der Gehalt jedes Legierungselementes unter 5% liegt (außer Schnellarbeitsstähle):

Aufbau:

- Der Kennzahl für den Kohlenstoffgehalt:
(Kennzahl = Kohlenstoffgehalt in $\%:100$)
- Den chemischen Symbolen der Legierungselemente, in der Reihenfolge nach deren Gehalten

- c) Den mit Faktoren multiplizierten Gehalten der Legierungselemente

Legierungselement	Faktor
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Cu, Mo, Pb, Ta, Ti, V	10
C, Ce, N, P, S	100
B	1000

Tabelle 7: Faktoren für Legierungselemente nach EN 10083

Beispiel:

25CrMoS4 ist ein legierter Stahl (Vergütungsstahl) nach EN 10277-5 mit $25 : 100 = 0,25\%$ C, $4:4 = 1\%$ Cr. Mo- und S-Gehalt ist nicht angegeben.

- Legierte Stähle (außer Schnellarbeitsstähle), sofern der Legierungsgehalt eines Legierungselementes $\geq 5\%$ ist

Der Kurzname besteht aus:

- Dem Kennbuchstaben X für „hochlegierte“ Stähle
- Der Kennzahl für den Kohlenstoffgehalt (Kennzahl = Kohlenstoffgehalt in $\% \cdot 100$)
- Den chemischen Symbolen der Legierungselemente
- Den Gehalten der Legierungselemente, die direkt in Prozent angegeben sind

Beispiel:

X10CrNi18-8 ist ein legierter, korrosionsbeständiger Stahl nach EN 10088-2 mit $10 : 100 = 0,10\%$ C, 18% Cr und 8% Ni.

- Schnellarbeitsstähle

Der Kurzname besteht aus:

- Den Kennbuchstaben HS für Schnellarbeitsstähle
- Den Gehalten der Legierungselemente (Reihenfolge W, Mo, V, Co), direkt in Prozent

Beispiel:

HS2-9-2 ist ein Schnellarbeitsstahl nach EN ISO 4957 mit 2% Wolfram, 9% Molybdän, 2% Vanadium, kein Cobalt.

- Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse

Werden Stähle bei der Verarbeitung zu Stahlerzeugnissen einer weiteren Behandlung zugeführt, kann diese im Kurznamen durch Zusatzsymbole dargestellt werden. Diese Symbole geben die Eignung des Stahles für besondere Anforderungen, die Art des Überzuges oder den Behandlungszustand an. Sie werden an den Kurznamen des Stahles durch ein Pluszeichen angehängt.

Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse	
Symbol	Bedeutung
für besondere Anforderungen (Auswahl)	
+C	Grobkornstahl
+CH	Mit Kernhärbarkeit
+F	Feinkornstahl
+H	Mit besonderer Härbarkeit
+Z15	Mindestbrucheinschnürung 15%
+Z25	Mindestbrucheinschnürung 25%
+Z35	Mindestbrucheinschnürung 35%
für die Art des Überzuges (Auswahl)	
+A	Feueraluminiert
+AZ	AlZn-Überzug
+CU	Kupferüberzug
+IC	Anorganische Beschichtung
+OC	Anorganische Beschichtung
+S	Feuerverzinkt
+SE	Elektrolytisch verzinkt
+T	Schmelztauchveredelt mit Blei-Zinn-Legierung (Terne)
+Z	Feuerverzinkt
+ZE	Elektrolytisch feuerverzinkt

Tabelle 8: Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse nach EN 10027 - Teil 1 (Auswahl)

für die Art des Behandlungszustandes (Auswahl)	
+A	Weichgeglüht
+AC	Geglüht zur Erzielung kugelig Carbid
+AT	Lösungsgeglüht
+C	kaltverfestigt (z.B. durch Walzen oder Ziehen)
+Cnnn	Kaltverfestigt auf eine Mindestzugfestigkeit von nnn N/mm ²
+LC	Leicht nachgezogen bzw. leicht nachgewalzt (skin passed)
+M	Thermomechanisch gewalzt
+N	Normalgeglüht
+NT	Normalgeglüht und angelassen
+Q	Abgeschreckt
+QA	Luftgehärtet
+QO	Ölgehärtet
+QT	Vergütet
+QW	Wassergehärtet
+S	Behandelt auf Kaltscherbarkeit
+T	Angelassen
+U	Unbehandelt

Tabelle 9: Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse nach DIN 10027 – Teil 2 (Auswahl)

Beispiel:

S235J2+Z ist ein Stahlbaustahl mit einer Mindeststreckgrenze $R_e = 235 \text{ N/mm}^2$, einer Kerbschlagarbeit von 27J bei -20°C , feuerverzinkt

2.1.3. Einteilung der Stähle nach Werkstoffnummern

Die ursprüngliche Werkstoffbezeichnung nach einem Nummernsystem der DIN 17007, welches auch für nichtmetallische vorgesehen war, wurde im März 1997 ersatzlos zurückgezogen.¹¹ Das Nummernsystem bestand aus einer siebenstelligen Ziffernfolge:

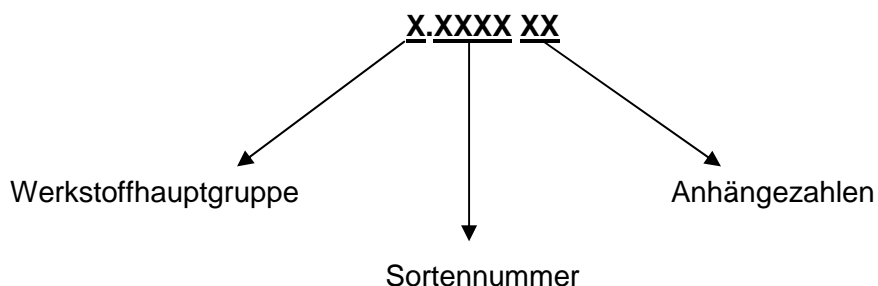


Abbildung 2: Nummernsystem der DIN 17007

¹¹ Wenglorz H.-W.: Europäische Aluminiumwerkstoffe: Vergleich von EN mit DIN, 2013, S. 38

Ziffer	Hauptgruppe
0	Roheisen und Ferrolegierungen (auch Gusseisen)
1	Stahl
2	Schwermetalle ausser Eisen
3	Leichtmetalle
4 bis 8	Nichtmetallische Werkstoffe
9	frei für interne Benutzung

Tabelle 10: Rahmenplan für Werkstoffhauptgruppen nach DIN 17007

Dieses Nummernsystem wurde für Stahl entsprechend der EN 10027-2 adaptiert, die Anhängeszahlen wurden weggelassen.

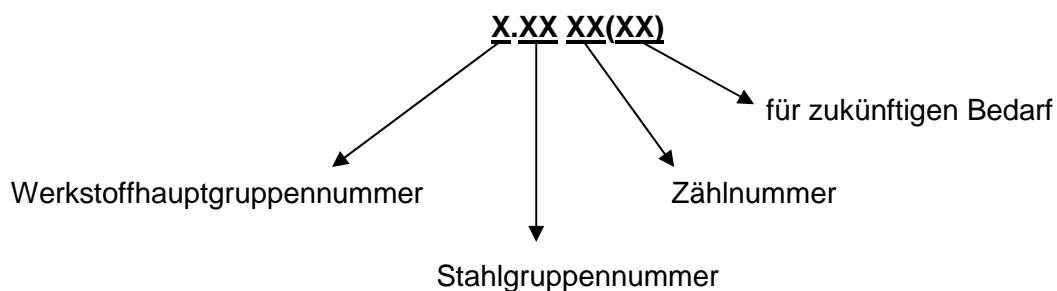


Abbildung 3: Nummernsystem für Stahl nach EN 10027-2

- Stahlgruppennummern

Alle metallischen Werkstoffe können entweder mit Kurznamen oder mit Werkstoffnummern bezeichnet werden. Das System für die Stahlgruppen-Nummer unterscheidet unlegierte Stähle und legierte Stähle, die jeweils in Qualitäts- und Edelstähle unterteilt sind. Übersicht der Stahlgruppennummern der unlegierten Stähle:

Unlegierte Qualitätsstähle	
00, 01, 90, 91	allgemeine Baustähle, $R_m < 500 \text{ N/mm}^2$
02, 92	sonstige, nicht für eine Wärmebehandlung bestimmte Baustähle, $R_m < 500 \text{ N/mm}^2$
03, 93	Stähle mit $C < 0,12\%$ oder $R_m < 400 \text{ N/mm}^2$
04, 94	Stähle mit $0,12\% < C < 0,25\%$ oder $400 \text{ N/mm}^2 < R_m < 500 \text{ N/mm}^2$
05, 95	Stähle mit $0,25\% < C < 0,55\%$ oder $500 \text{ N/mm}^2 < R_m < 700 \text{ N/mm}^2$
06, 96	Stähle mit $C > 0,55\%$ oder $R_m > 700 \text{ N/mm}^2$
07, 97	Stähle mit höherem Phosphor- und Schwefelgehalt

Tabelle 11: Stahlgruppennummern für unlegierte Qualitätsstähle nach EN 10027-2

Unlegierte Edelstähle	
10	Stähle mit besonderen physikalischen Eigenschaften
11	Bau-, Maschinenbau- und Behälterstähle mit C < 0,5%
12	Maschinenbaustähle mit C > 0,5%
13	Bau-, Maschinenbau- und Behälterstähle mit besonderen Anforderungen
15 - 18	Unlegierte Werkzeugstähle

Tabelle 12: Stahlgruppennummern für unlegierte Edelstähle nach EN10027-2

Legierte Qualitätsstähle	
08, 98	Stähle mit besonderen physikalischen Eigenschaften
09, 99	Stähle für verschiedene Anwendungsbereiche
Legierte Edelstähle	
20 - 28	Legierte Werkzeugstähle
32	Schnellarbeitsstähle ohne Cobalt
33	Schnellarbeitsstähle mit Cobalt
35	Wälzlagerstähle
36, 37	Stähle mit besonderen magnetischen Eigenschaften
40 - 45	Nichtrostende Stähle
47, 48	Hitzebeständige Stähle
49	Hochwarmfeste Werkstoffe
50 - 84	Bau-, Maschinenbau- und Behälterstähle mit verschiedenen Legierungskombinationen
85	Nitrierstähle
87 - 89	Hochfeste schweißgeeignete Stähle

Tabelle 13: Stahlgruppennummer für legierte Stähle nach EN 10027-2

Beispiel:

1.0143(XX) (entspricht dem S275J0)

Wst. Hauptgruppe 1 für Stahl – Stahlgruppennummer 01 für Baustahl - Zählnummer 43

2.1.4. Einteilung der Stähle nach Zusammensetzung und Güteklassen

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften, wie z.B. die Zugfestigkeit, bzw. fertigungstechnische Eigenschaften, wie z.B. die Schweißbarkeit der Stähle werden durch ihre Zusammensetzung, ihr Gefüge und ihren Behandlungszustand definiert. Die Stahlgruppen orientieren sich nach der Zusammensetzung und der Hauptgüteklassen.

- Einteilung nach der Zusammensetzung

Unlegierte Stähle: Als unlegierter Stahl werden Stähle bezeichnet, bei denen kein Legierungselement die in der Tabelle 14 genannten Grenzwerte erreicht.

Element	%	Element	%	Element	%
Al	0,30	Mo	0,08	Te	0,10
Bi	0,10	Nb	0,06	Ti	0,05
Co	0,30	Ni	0,30	V	0,10
Cr	0,30	Pb	0,40	W	0,30
Cu	0,40	Se	0,10	Zr	0,05
Mn	1,65	Si	0,60	sonstige (außer, C, P, S, N)	0,10

Tabelle 14: Grenzwerte der Legierungselemente für unlegierte Stähle nach EN 10020

Legierte Stähle: Stähle, bei denen mindestens ein Legierungselement den Grenzwert der Tabelle 14 überschreitet. Weiters Stähle, die nicht der Definition der nichtrostenden Stähle entsprechen.

Nichtrostende Stähle: Nichtrostende Stähle besitzen einen Chromgehalt von mindestens 10,5% und einen Kohlenstoffgehalt von höchstens 1,2%. Nach den Haupteigenschaften unterscheidet man korrosionsbeständige, hitzebeständige und warmfeste Stähle.

- Einteilung nach Hauptgüteklassen

Der Restgehalt an Roheisen-Begleitstoffen im Stahl, die durch den Roheisenherstellungssprozess im Stahl enthalten sind, hat großen Einfluss. Typische Begleitelemente wie Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel, Wasserstoff usw., wurden während des Stahl-Herstellungsprozesses sowie durch die Stahlnachbehandlungsprozesse vermindert. Die Unterteilung erfolgt nach dem erzielten Verminderungsgrad der Begleitstoffe bzw. der Genauigkeit der Gehalte der Legierungselemente.

Unlegierte Qualitätsstähle: keine Anforderung an den Reinheitsgrad, kein gleichmäßiges Ansprechen auf eine Wärmebehandlung, festgelegte Anforderungen an die Zähigkeit, Korngröße und Umformbarkeit, die Herstellung erfordert besondere Sorgfalt, da sie bestimmte Gebrauchseigenschaften aufweisen.

Unlegierte Edelstähle: sind definiert durch einen höheren Reinheitsgrad gegenüber Qualitätsstählen (sog. Eisenbegleiter $<0,025\%$), in der Regel für eine Wärmebehandlung bestimmt, Anforderungen an die Kerbschlagarbeit im wärmebehandelten Zustand, aufwändige Herstellung (genaue chemische Zusammensetzung, Wärmebehandlung, Prüfung), hoher Reinheitsgrad (P, S je $<0,035\%$), geeignet für hochbeanspruchte Maschinenbauteile und Schweißzusatzwerkstoffe.

Nichtrostende Stähle: Die Unterteilung erfolgt nach dem Nickelgehalt in Stähle mit weniger als 2,5% bzw. Stähle mit mehr als 2,5% Nickel. Nach den Haupteigenschaften erfolgte eine Einteilung in korrosionsbeständige, hitze- und zunderbeständige und in warmfeste Stähle.

Legierte Qualitätsstähle: festgelegte Anforderungen z.B. bezüglich der Festigkeit, Zähigkeit, Korngröße, Umformbarkeit oder Kerbschlagarbeit. Beispiele für solche Qualitätsstähle sind Stähle für Spundwände, Schienen oder für kaltgewalzte Flacherzeugnisse, die kornfeinende Legierungselemente enthalten, die die Grenzwerte der folgenden Tabelle nicht überschreiten:

Element	%	Element	%
Cr	0,30	Ni	0,08
Cu	0,10	Ti	0,06
Mn	0,30	V	0,30
Mo	0,30	Zr	0,40
Nb	0,40		

Tabelle 15: Grenzwerte zwischen legierten Qualitäts- und Edelstähle schweißgeeigneter Feinkornbaustähle nach EN 10020

Legierte Edelstähle: hohe Anforderungen an Herstellungs- und Prüfbedingungen, hohe Anforderung an den Reinheitsgrad (sog. Eisenbegleiter $<0,025\%$), Legierungsbestandteile überschreiten die Grenzwerte nach Tabelle 15, die meisten sind für eine Wärmebehandlung vorgesehen. Sie umfassen unter anderem hitzebeständige oder hochwarmfeste Stähle.¹²

¹² <http://kerschgens.stahl-lexikon.de/index.php/stahllexikon/39-e/1437-Einteilung%20der%20St%C3%A4hle.html>, Stand: 12.10.2017

2.1.5. Stahlsorten und ihre Verwendung

Die Einteilung nach dem Verwendungszweck ist nicht genormt, ist jedoch weit verbreitet. Die Stähle werden in Baustähle und Werkzeugstähle eingeteilt.

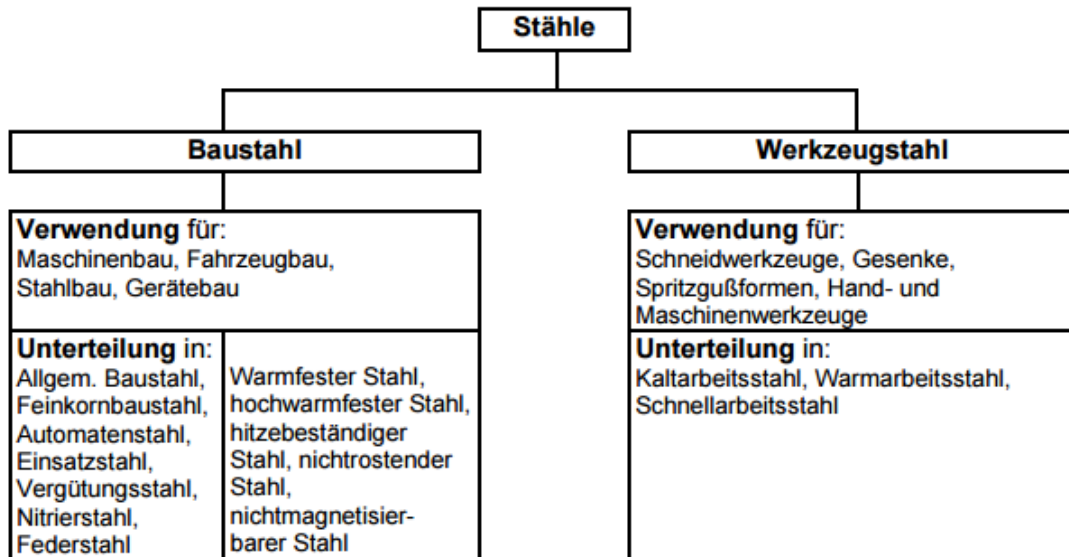


Abbildung 4: Stahleinteilung nach Verwendungszweck¹³

Baustähle besitzen in der Regel einen Kohlenstoffgehalt von 0,05 – 0,6%, die Werkzeugstähle enthalten 0,6 – 2,2% Kohlenstoff.

2.1.6. Handelsformen der Stähle

Durch Stranggießen und anschließendem Walzen, Strangpressen und Ziehen wird der Stahl zu den verschiedenen Stahlerzeugnissen für den Handel geformt. Zu den gängigsten Handelsformen gehören Formstähle (I – Träger, T – Profile, L-Profil etc.), Stabstähle mit unterschiedlichen Querschnitten (Rundstahl, Vierkantstahl, Dreieckstahl etc.), Rohre und Hohlprofile (Rundrohr, Rechteckrohr, Quadratrohr etc.), Bleche (Bänder, Coils oder Tafeln) und Drähte (siehe Anhang 2).¹⁴

¹³ <http://www.wkv.at/service/lehr/fragenkataloge/WM/Leitfaden%20WM%203-1.pdf>, Stand: 12.10.2017

¹⁴ <http://www.metalltechnik-lexikon.de/handelsformen-bei-staehlen/>, Stand: 12.10.2017

2.1.7. Legierungselemente der Stähle

Bei den Legierungselementen wird grundsätzlich unterschieden, ob sie eine bestimmte Kornbildung fördern, z.B. Ferritbildner, Austenitbildner, Martensitbildner, Karbidbildner etc. oder welchem Zweck die Zulegierung dienlich ist. Jedes einzelne Element verändert je nach Anteil bestimmte spezifische Eigenschaften des Stahls. Beim Anwesenheit mehrerer Elemente kann eine bestimmte Wirkung gesteigert, verzerrt oder aufgehoben werden. Die Zulegierung bestimmter Elemente legt dabei meist nur die Voraussetzung zur Erreichung bestimmter Eigenschaften. Durch Anwendung bestimmter Verarbeitungs- oder Wärmebehandlungsmethoden erreicht man erst die geforderten Eigenschaften (Anhang 3¹⁵).

2.1.8. Begleitelemente der Stähle

Begleitelemente sind ist erster Linie Elemente, die nicht als Legierungselemente angesehen werden und deren Werte eine in den Werkstoffnormen festgelegte Obergrenze nicht überschreiten dürfen, da sie bereits in geringen Mengen die Stahleigenschaften negativ verändern können¹⁶ (Anhang 4¹⁵).

Kohlenstoff zählt beispielsweise zu den Begleitelementen und nicht zu den Legierungselementen. Daher ist es möglich, auch Stähle mit mehr als 1% Kohlenstoff als „unlegiert“ zu betrachten.¹⁷

2.2. Wärmebehandlung der Stähle

Durch Wärmebehandlung werden die Eigenschaften der Stähle entsprechend Ihrer weiteren Verwendung verändert. Insbesondere werden die Härte, die Festigkeit und die Bearbeitbarkeit verändert. Ursache der Verbesserung der Eigenschaften sind Veränderungen des Werkstoffgefüges.

¹⁵ <https://www.overhoff.de/Daten/Legierungselemente.pdf>, Stand: 12.10.2017

¹⁶ Hasse S.: Giesserei Lexikon, 2001, S. 136

¹⁷ Gobrecht J.: Werkstofftechnik - Metalle, 2006, S. 76

2.2.1. Gefügearten der Eisenwerkstoffe

Aus dem Herstellungsprozess haben Eisenwerkstoffe einen bestimmten Gehalt an Kohlenstoff. Dieser Kohlenstoffgehalt kann einerseits störend sein, weil er das Eisen bei zu großem Anteil versprödet. Andererseits ist ein gewisser Kohlenstoffgehalt im Eisen die Voraussetzung vieler Eigenschaftsverbesserungen durch Wärmebehandlung.

Der Kohlenstoff im Eisen nimmt Einfluss auf den inneren Aufbau. Untersucht man das Gefüge von langsam abgekühltem Stahl, so stellt man fest, dass sich je nach Kohlenstoffgehalt unterschiedliche Gefügearten ausbilden. Technisch reines Eisen bildet ein Gefüge aus abgerundeten Körnern. Dieses Gefüge wird Ferrit oder α – Eisen genannt. Es ist relativ weich, leicht umformbar, gießbar und magnetisierbar.

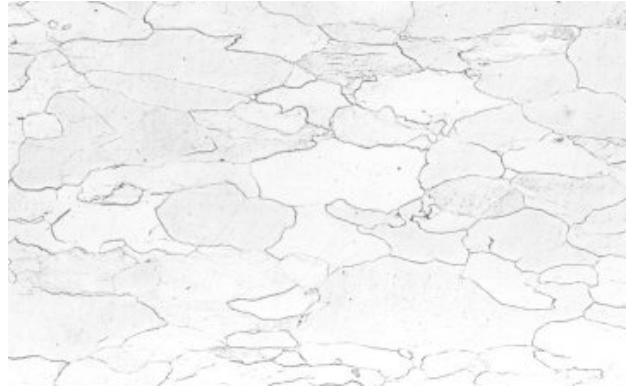


Abbildung 5: Ferritgefüge¹⁸

Stahl enthält den Kohlenstoff nicht in reiner Form, sondern als chemische Verbindung Eisencarbid Fe_3C . Man nennt diesen Gefügebestandteil Zementit. Er ist hart und spröde.

Bei niedrigem Kohlenstoffgehalt im Stahl (bis 0,8%) scheidet sich der Zementit in Form dünner Streifen (Streifenzementit) aus, die die Ferritkörner durchziehen. Dieses Gefüge aus Streifenzementit in Ferritkörner nennt man Perlit. Stähle mit weniger als 0,8% Kohlenstoff haben ein Gefüge, das Ferritkörner und Perlitkörner enthält.

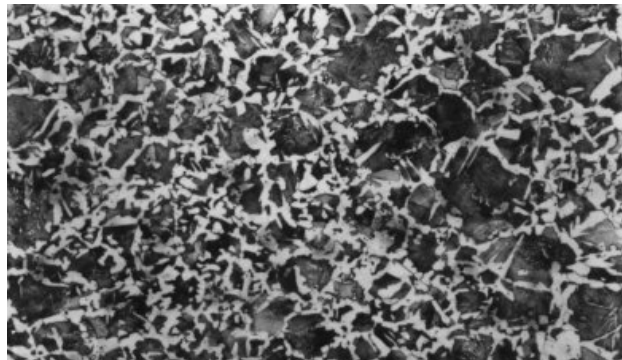


Abbildung 6: Ferrit-Perlit-Gefüge mit 0,4% C¹⁸

¹⁸ Dressel P.: Programm „Grundlagen der Wärmebehandlung“, 2001, Siegen, Deutschland

In Stahl mit 0,8% Kohlenstoff sind alle Ferritkörner mit Streifenzementit durchzogen. Man spricht auch von einem Gefüge mit 100% Perlit. Dies bedeutet, dass die Aufnahmefähigkeit von Streifenzementit innerhalb des Ferritkornes vollkommen gesättigt ist. Eine weitere Aufnahme von Streifenzementit innerhalb des Ferritkornes ist daher nicht möglich. Dieser Stahl wird auch als eutektoider Stahl bezeichnet.

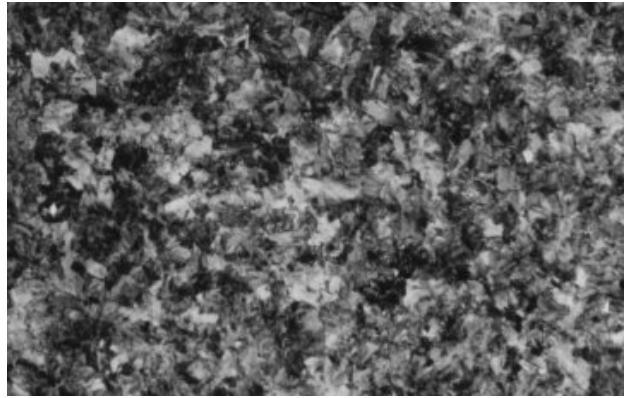


Abbildung 7: Perlit-Gefüge mit 0,8% C¹⁹

Stähle mit mehr als 0,8% Kohlenstoff enthalten so viel Kohlenstoff, dass sich zusätzlich zum Streifenzementit in den Ferritkörnern noch Zementit an den Korngrenzen (Korngrenzenzementit) ablagert. Je größer der Zementitanteil im Gefüge ist, desto härter, aber auch umso spröder ist der Stahl.

Eisen mit mehr als 2,06% Kohlenstoff nennt man Gusseisen. Zu dem hohen Kohlenstoffgehalt werden Elemente wie Silizium (Graphitbildner), Mangan (verbesserte Zerspanbarkeit), Chrom (Festigkeitssteigerung) oder Nickel (Zähigkeitsverbesserung) zulegiert. Das Silizium bewirkt, dass sich der Kohlenstoff nicht in gebundener Form als Zementit Fe_3C im Gefüge bildet. Es bewirkt eine Ausscheidung von reinem Kohlenstoff C in Form von Grafitlamellen. Die Form der eingelagerten Graphitteilchen, ihre Größe und Verteilung haben erheblichen Einfluss auf die Eigenschaften des Werkstoffes. Sie lassen sich wiederum durch metallurgische Behandlungen beeinflussen.²⁰

Die Ausscheidungsarten in Gussteilen sind im Allgemeinen:

Das Grundgefüge besteht aus Perlit oder Ferrit-Perlit-Körner. Der über 0,8% liegende Anteil des Kohlenstoffs scheidet sich als Grafitlamellen an den Korngrenzen aus, während der übrige Anteil des Kohlenstoffs als Streifenzementit kristallisiert.

¹⁹ Dressel P.: Programm „Grundlagen der Wärmebehandlung“, 2001,

²⁰ Elvira Moeller: Handbuch Konstruktionswerkstoffe – Auswahl, Eigenschaften, Anwendung, 2014, S 275

2.2.2. Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild

Das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild bildet eine diagrammartige Übersicht über temperaturabhängige Gefügezustände, abhängig vom Kohlenstoffgehalt.

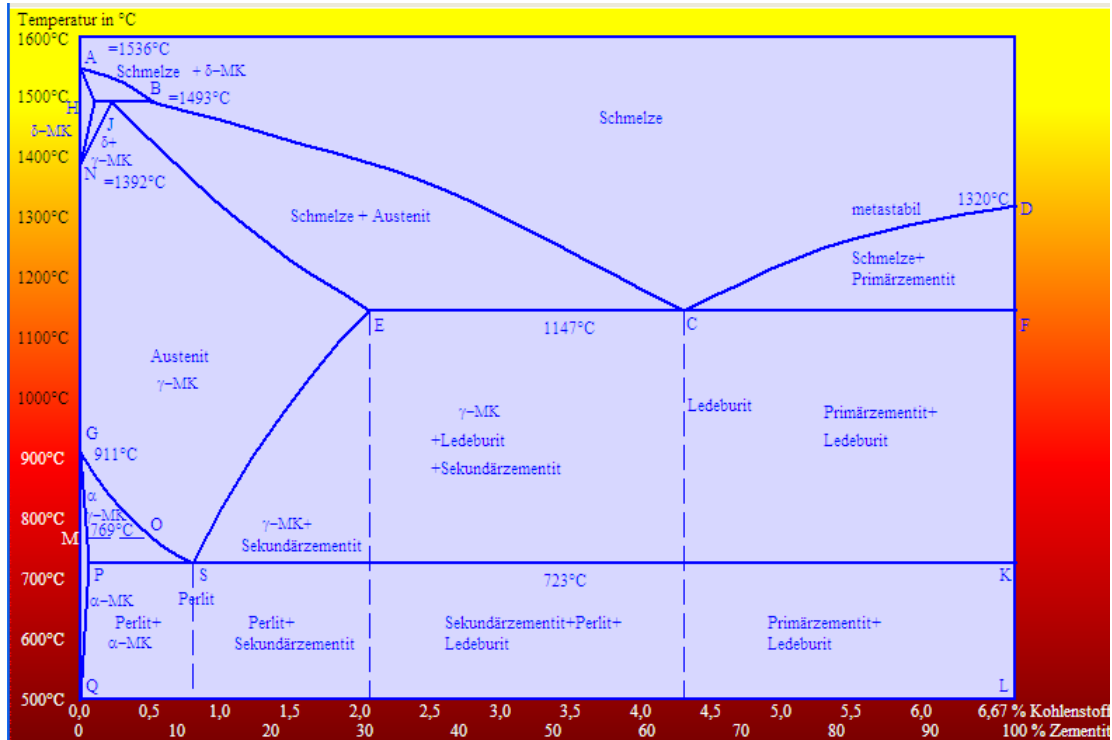


Abbildung 8: metastabiles Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm²¹

Die durchgezogenen und unterbrochenen Linien im Schaubild begrenzen die Gefügebereiche. So trennt z.B. die Linie P-S den Bereich des Ferrit-Perlit-Gefüges vom Bereich des Austenit-Ferrit-Gefüges oder die Linie G-S den Bereich des Austenit-Ferrit-Gefüges vom Bereich des Austenit-Gefüges. Die Gefügearten bei Raumtemperatur und bis 723°C sind im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm über der Kohlenstoffachse eingetragen.

Das Schaubild ist am rechten Ende mit 6,67% Kohlenstoffanteil begrenzt, dies entspricht 100% Zementit Fe_3C . Der C-Gehalt von Fe_3C berechnet sich mit der Formel:²²

$$C = \frac{\text{Relative Atommasse C}}{\text{relative Molekülmasse Fe}_3\text{C}} \cdot 100\% = \frac{12}{180} \cdot 100\% = 6,67\%$$

Formel 1: Berechnung von 100% Zementit Fe_3C im Stahl

²¹ Dressel P.: Programm „Grundlagen der Wärmebehandlung“, 2001

²² Weißbach & Co: Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, 2015, S. 118

Gitterstrukturen und Gefügearten bei Erwärmung

Das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild ist vor allem für die Stähle von besonderer Bedeutung. Dies betrifft den Bereich von 0,1% bis 2,06% Kohlenstoff. Diese Stähle werden einer Wärmebehandlung unterzogen, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern. Im Inneren des Werkstoffes laufen dabei vielfältige Vorgänge ab.

Erwärmt man Stahl auf über 723°C, erfolgt eine Gefügeumwandlung. Ursache dieser Gefügeumwandlung ist eine geringfügige Verschiebung der Atomenebenen des Metallgitters. Bei Erwärmung auf 723°C klappt das kubisch-raumzentrierte krz. Perlitgitter in das kubisch-flächenzentrierte krz. Austenitgitter um. Kohlenstoffatome können aus dem aufgelösten Streifenzenitit in die frei werdende Würfelmitte des kfz. Gitters hinein wandern. Es entstehen Mischkristalle. Man bezeichnet das entstandene Gefüge als Austenit oder γ -Eisen.

Bei Stahl mit 0,8% Kohlenstoff (Perlitgefüge) erfolgt diese Umwandlung vollständig bei 723°C (Punkt S).

Bei untereutektoiden Stählen (weniger als 0,8% C) geht der Perlitanteil des Ferrit-Perlit-Gefüges bei 723°C in Austenit über. Der restliche Ferritanteil des Gefüges wandelt sich im Temperaturbereich zwischen der Linie P-S und der Linie G-S allmählich in Austenit um. Oberhalb der Linie G-S ist das gesamte Gefüge in Austenit umgewandelt.

Bei Stählen mit mehr als 0,8% Kohlenstoff wandelt sich beim Überschreiten der Linie S-K der Perlit des Perlit-Korngrenzzenitit-Gefüges in Austenit um. Der Korngrenzzenitit löst sich im Temperaturbereich zwischen den Linien S-K und S-E allmählich im bereits vorliegenden Austenit auf. Oberhalb der Linie S-E besteht das Gefüge ausschließlich aus Austenit.

Die bei der Erwärmung des Stahls beschriebenen Vorgänge laufen bei langsamer Abkühlung umgekehrt ab. Der Austenit wandelt sich bei 723°C wieder in Perlit um.

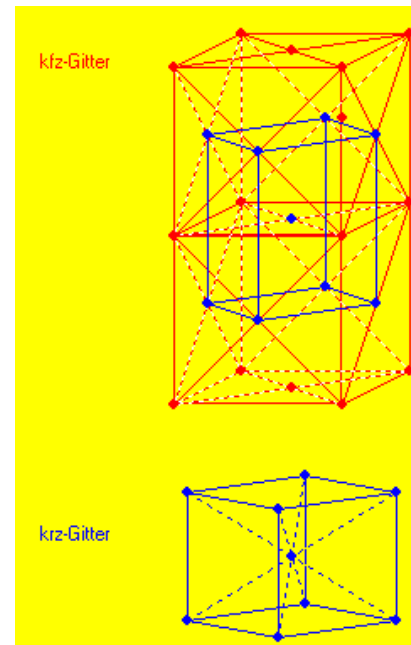


Abbildung 9: Gefügeumwandlung α - und γ -Eisen bei Erwärmung²³

²³ Dressel P.: Programm „Grundlagen der Wärmebehandlung“, 2001

2.2.3. Glühen

Das Glühen gehört nach DIN 8580/03 zu der Fertigungshauptgruppe 6 „Stoffeigenschaften ändern“ bzw. zu der Gruppe 6.2 „Wärmebehandlungen“ und bildet die Untergruppe 6.2.1 „Glühen“.

Das Glühen besteht aus langsamem Erwärmen, Halten auf Glüh­temperatur und langsamem Abkühlen jeweils im festen Zustand, eine Veränderung der Form ist, bis auf wenige Ausnahmen, nicht beabsichtigt.²⁴ Die Glühverfahren unterscheiden sich durch die Höhe der Glüh­temperaturen und die Länge der Glühzeiten und lassen sich um Eisen-Kohlenstoff-Schaubild so darstellen:

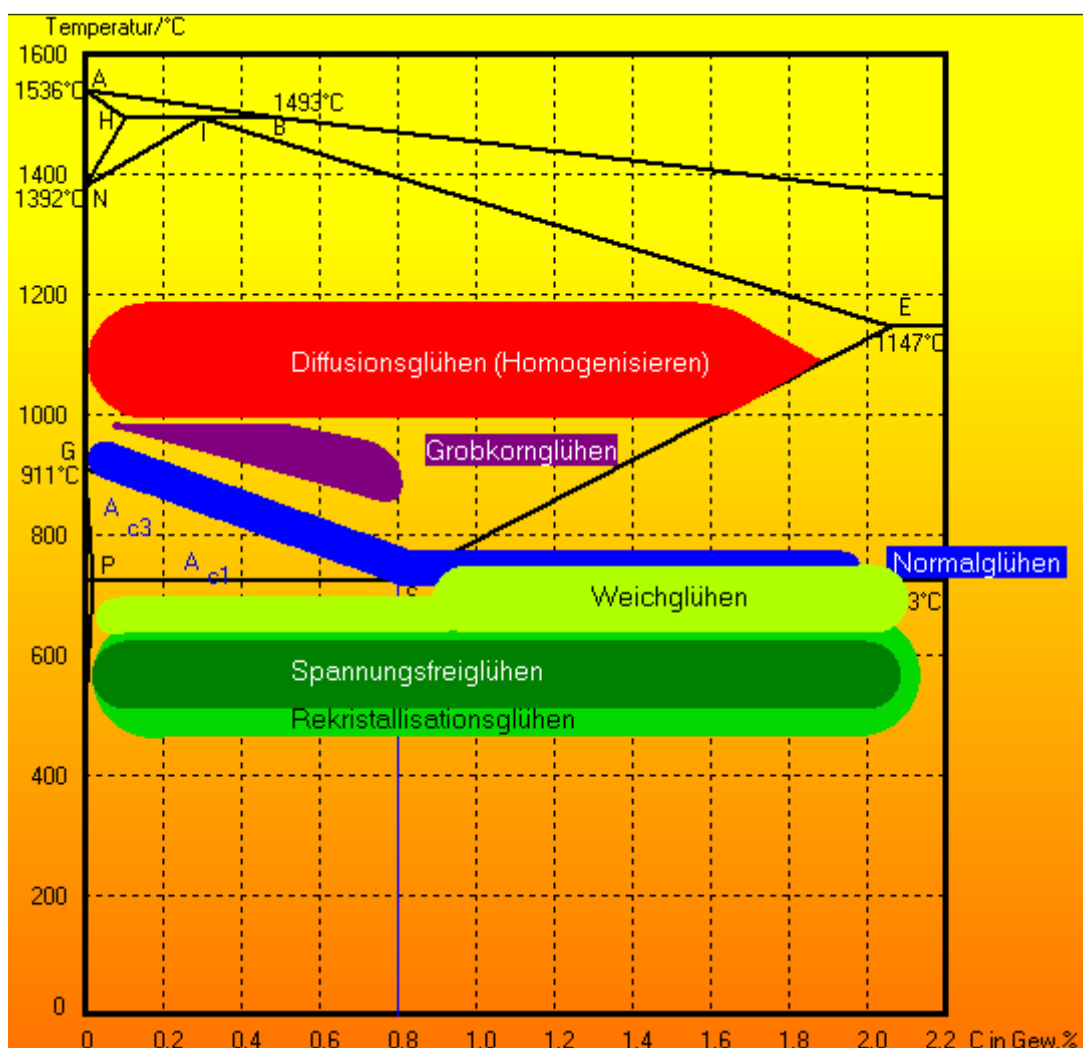


Abbildung 10: Temperaturführung verschiedener Glühverfahren²⁵

²⁴ Alfred Böge: Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendung der Maschinenbautechnik, 2007, S. E21

²⁵ Dressel P.: Programm „Grundlagen der Wärmebehandlung“, 2001

- **Spannungsarmglühen:**

Wird angewendet um innere Spannungen im Werkstück durch plastisches Fließen des Werkstoffes zu verringern. Maximaler Spannungsabbau auf den Wert der temperaturbezogenen Warmfließgrenze. Bei Guss- und Schmiedeteile wird dies meist vor der spanenden Bearbeitung angewendet, bei Schweißkonstruktionen kann der durch das Schweißen beeinflusste Bereich (WEZ – Wärmeeinflusszone) entspannen. Anschließend erfolgt eine langsame Abkühlung, damit keine neuen Spannungen entstehen können. Der Temperaturbereich liegt bei 550°C bis 650°C über 2 bis 4 Stunden.²⁶

- **Rekristallisationsglühen (Zwischenglühen):**

Eigenschaftsveränderungen durch Kaltverformung werden rückgängig gemacht. Wird auch als Zwischenschritt zwischen zwei Verformungsvorgängen zur Wiederherstellung von Verformungsvermögen angewandt (daher „Zwischenglühen“). Bei kleinen Verformungsgraden und hohen Glüh Temperaturen kann der Stahl allerdings zur Grobkornbildung neigen. Eine Kornneubildung ohne Gitterumwandlung wird erreicht durch langes Glühen über mehrere Stunden bei 550°C bis 650°C.²⁶

- **Weichglühen:**

Man erwärmt den Stahl je nach Kohlenstoff auf 680°C bis 750°C und hält ihn dort mehrere Stunden. Die gleiche Wirkung erreicht man bei über eutektoiden Stählen durch Pendelglühen um die SK-Linie. Durch das Weichglühen verwandelt sich der Streifen zementit in körnigen Zementit um. Dadurch senkt sich die Gefügehärte und der Werkstoff wird leichter spanlos umformbar bzw. leichter spanabhebend bearbeitbar. Wird bei Stählen mit weniger als 0,4% C nicht angewandt, da sie zu weich werden würden.²⁶

- **Normalglühen:**

Es erfolgt durch kurzzeitiges Glühen bei ca. 30-40°C oberhalb der GSK-Linie. Dabei kommt es zur Neubildung von Perlitkörnern. Es können typische Erstarrungsgefüge von Schweißnähten (Widmannstättensches Gefüge) oder beispielsweise Grobkorngefüge bei Schmiedeteile aufgelöst werden. Daher wird das Normalglühen auch als „Rückfeinen“ bezeichnet. Es wird unterschieden in BF-Glühen (auf bestimmte Festigkeit) oder BG-Glühen (auf bestimmtes Gefüge).²⁶

²⁶ Alfred Böge: Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendung der Maschinenbautechnik, 2007, S. E21f.

- **Diffusionsglühen:**

Ist ein langzeitiges Glühen bei 1000°C bis 1200°C für ca. 20h. Es dient dazu, örtlich eingetretene Konzentrationsunterscheide auszugleichen (Homogenisieren) um eine gleichmäßige Verteilung löslicher Bestandteile zu erzielen. Kann zu Grobkorn führen, welches sich durch eine Warmumformung auflöst. Unter Umstände wird ein anschließendes Normalglühen notwendig.²⁷

- **Grobkornglühen:**

Ist ein Glühen bei einer Temperatur im Austenitbereich mit ausreichend langem Halten um ein gröberes Korn zu erzielen. Wird zur Verbesserung der spanabhebenden Bearbeitung bei untereutektoiden Stählen durchgeführt. Wird bevorzugt bei weichen Stählen (<0,4% C) angewandt, wenn ein spanabhebender Arbeitsschritt folgt.²⁷

2.2.4. Härten

Definition nach DIN EN 10025 ist Härten ein Austenitisieren und Abkühlen unter Bedingungen, die bei Härtesteigerung zur Martensit- und ggf. zur Bainitbildung führen.

Das Glühen gehört nach DIN 8580/03 zu der Fertigungshauptgruppe 6 „Stoffeigenschaft ändern“ bzw. zu der Gruppe 6.2 „Wärmebehandlungen“ und bildet die Untergruppe 6.2.2 „Härten“.²⁷

Härten besteht, wie aus der Abbildung 14 zu entnehmen ist, aus mehreren Arbeitsgängen. Zuerst wird das Werkstück zügig mit ca. 130°C pro Sekunde auf Härtetemperatur erwärmt und anschließend auf Härtetemperatur (oberhalb der GSK-Linie) gehalten. Danach erfolgt das Abschrecken, d.h. das Werkstück wird in ein geeignetes Abkühlmedium (Wasser, Öl, Wasser-Öl-Emulsion, Salzbäder) getaucht. Dadurch wird der Stahl sehr hart, aber auch spröde und bruchempfindlich. Deshalb wird das Werkstück anschließend angelassen, d.h. erneut erwärmt (deutlich unterhalb der GSK-Linie). Dann lässt man das Werkstück an der Luft abkühlen. Der Stahl hat dann seine Gebrauchshärte. Vor allem Werkzeuge und auf Verschleiß beanspruchte Bauteile werden gehärtet.

²⁷ Alfred Böge: Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendung der Maschinenbautechnik, 2007, S. E21f.

- **Gefügevorgänge beim Härten:**

Beim Erwärmen von Stahl über die Linie GSK im Fe-C-Zustandsdiagramm (siehe Kap. 2.2.2.) wandelt sich das kubisch raumzentriertes Ferritgitter vollständig in das kubisch-flächenzentriertes Austenitgitter um (=Austenitisieren). Der freiwerdende Platz in der Kristallmitte wird von einem Kohlenstoffatom besetzt, das aus dem Gefügebestandteil Zementit (Fe_3C) stammt.

- **Austenitisieren**

Da viele Verfahren von einem austenitischen Gefügezustand ausgehen, werden die Werkstücke durch Einbringen in einen vorgeheizten Härteofen im vollen Querschnitt auf Härtetemperatur gebracht (Durchwärmen) und für bestimmte Zeit auf Härtetemperatur gehalten. Es müssen die Eisenkarbide und das Ferrit vollständig in ein homogenes Gefüge aufgelöst werden.²⁸

Bei unlegierten Stählen ist die Härtetemperatur vom Kohlenstoffgehalt abhängig und kann im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm dargestellt werden. Sie soll etwa 40°C über der Linie GSK liegen. Dadurch wird eine sichere und vollständige Umwandlung des Ferrit-Perlit Gefüges in Austenit erzielt.

Zu niedrige Härtetemperatur oder zu kurze Haltezeit auf Härtetemperatur haben ungehärtete Werkstückbereiche (Weichfleckigkeit) zur Folge. Zu hohe Härtetemperatur führt zu grobnadeligem Härtegefüge mit großer Sprödigkeit.²⁹

Unlegierte Stähle mit mehr als 0,8% Kohlenstoff werden vor dem Härten weichgeglüht, sodass sie aus einer ferritischen Grundmasse mit kleinen Zementitkörnern bestehen. Beim Härten erhält man dann ein feinnadeliges Martensitgrundgefüge mit eingelagerten Zementitkörnern.

- **Langsame Abkühlung:**

Wird der austenitisierte Stahl langsam abgekühlt, wird die Umwandlung rückgängig gemacht. Es entsteht erneut ein kubisch-raumzentriertes Kristallgitter. Das Kohlenstoffatom hat ausreichend Zeit um aus der Würfelmitte heraus zu wandern und bildet mit Eisenatomen Zementit (Fe_3C), der sich als Streifenzenementit ausscheidet.

²⁸ Alfred Böge: Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendung der Maschinenbautechnik, 2007, S. E21f

²⁹ http://seeberger.net/_assets/pdf/16_Beeinflussung_durch_Waermebehandlungen.pdf, Stand: 12.10.2017

Es entsteht erneut perlitisches Gefüge. Dies entspricht der Wärmebehandlungsmethode Normalglühen. In der Abbildung 12 lässt sich erkennen, dass die Abkühlgeschwindigkeit für einen Stahl C45 ca. $0,8^{\circ}\text{C/s}$ beträgt.



Abbildung 11: C45 in normalgeglühtem Zustand³⁰

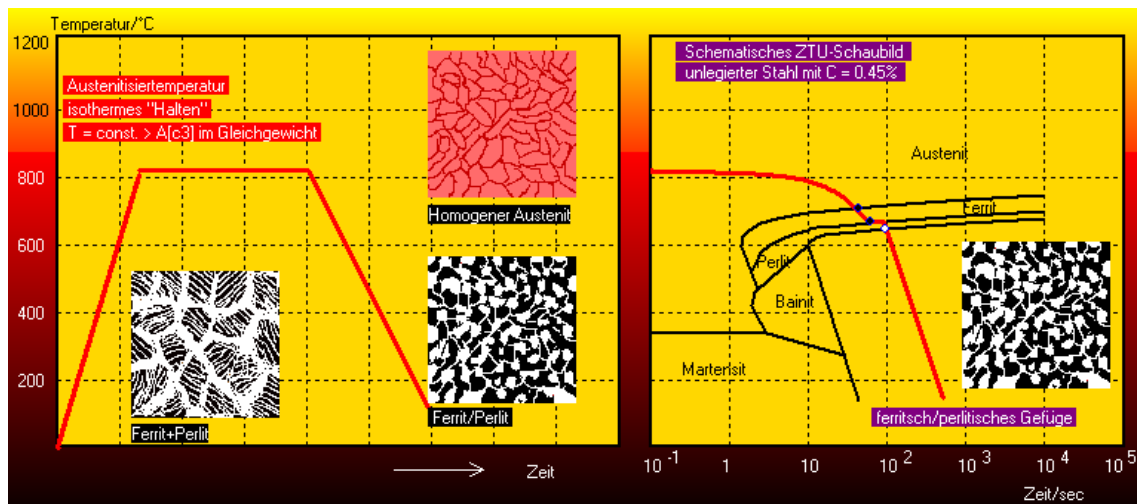


Abbildung 12: Temperaturverlauf und ZTU-Schaubild bei langsamer Abkühlung³⁰

- Abschrecken:

Der Stahl wird aus der jeweiligen Austenitisierungstemperatur rasch abgekühlt. Mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit werden die C-Atome bei der Diffusion aus der Würfelmittle behindert. Es entstehen Gefüge, die von vom Eisen-Kohlenstoff-Schaubild abweichen. Die Ferritausscheidung wird zunehmend gebremst, wodurch der Ferritanteil sinkt. Der Austenit zerfällt in Ferrit und mit zunehmend feiner werdenden Zementitlamellen. Dies führt bei zunehmender Abkühlgeschwindigkeit bis zur vollständigen Unterdrückung der Ferritausscheidung.



Abbildung 13: C45 im gehärteten Zustand³⁰

³⁰ Dressel P.: Programm „Grundlagen der Wärmebehandlung“, 2001

Der Austenit zerfällt zu sehr feinstreifigen Perlit, dem härteste Gefüge des Stahls, dem Martensit. Dies wird erst bei Überschreitung der kritischen Abkühlgeschwindigkeit erreicht. Dabei wird die Perlitbildung vollständig unterdrückt. Eine Diffusion der C-Atome wird vollständig unterbunden. Aus dem kfz.- Austenitgitter wird ein tetragonal verzerrtes krz. – Martensitgitter mit zwangsgelösten C-Atomen. Die durch die Verzerrung verursachte Volumensvergrößerung erzeugt im Gefüge innere Spannungen.³¹

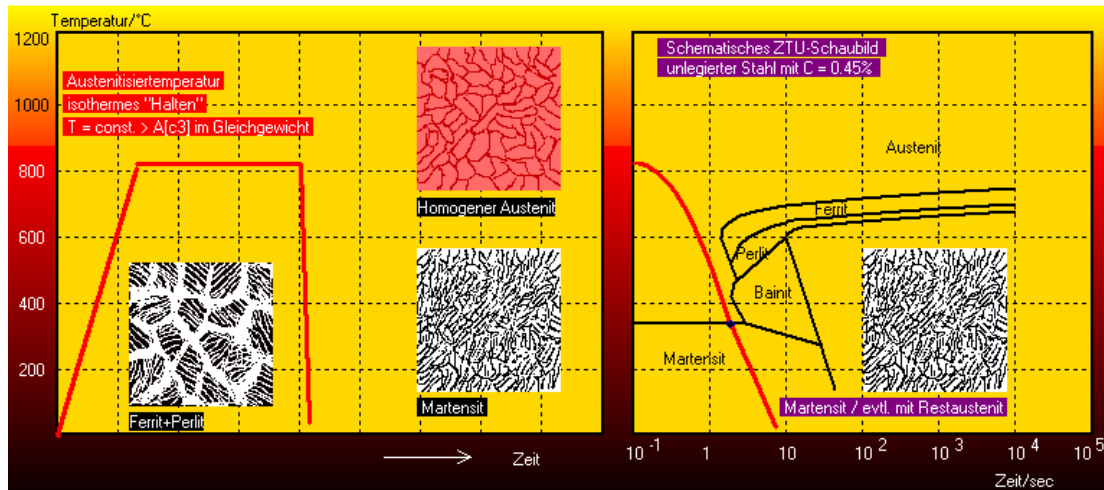


Abbildung 14: Temperaturverlauf und ZTU-Schaubild beim Härten³²

Die Abschreckwirkung wird beeinflusst von der Härbarkeit des Stahles, Abschreckvermögen des Abschreckmittels, Bewegung und Temperatur des Abschreckmittels, Wärmeleitfähigkeit des Werkstücks, Abmessung und Form des Werkstücks, Verweilzeit des Werkstücks im Abkühlmittel und des Oberflächenzustandes. Ein optimales Abschreckmittel sollte die Eigenschaft besitzen, im Bereich der Perlitbildung möglichst hohe Wärmeabfuhr, jedoch im Bereich der Martensitbildung eine niedrige Wärmeabfuhr zur Verringerung der Rissgefahr zu gewährleisten.

- Anlassen nach dem Härten

Das Abschrecken macht den Stahl sehr spröde und hart. Der harte und spröde Martensit verursacht innere Gefügeverspannungen, die Härteverzug, Härterisse und bei Belastung Sprödbbruch hervorrufen können. Diese Versprödung frisch gehärteter Werkstücke wird durch das auf Anlasstemperatur bringen des Werkstücks verringert. Durch das Anlassen (unlegierte Stähle 200-350°C) wird die Sprödigkeit des Stahls vermindert und die Zähigkeit erhöht, die Härte nimmt geringfügig ab.³³

³¹ Bargel H.-J., Schulze G: Werkstoffkunde, 2000, S. 169ff.

³² Dressel P.: Programm „Grundlagen der Wärmebehandlung“, 2001

³³ Bartenschlager J. & Co: Fachkunde Metall – Mechanische Technologie, 2014, S. 305

- Einhärtungstiefe

Die Wärme wird beim Abschrecken aus der Randschicht des Werkstücks schneller abgeleitet als aus dem Werkstückinneren. Die Abkühlungsgeschwindigkeit ist daher in der Randschicht deutlich größer, als im Inneren. Bei unlegiertem Stahl bildet sich aufgrund der unterschiedlichen Abkühlungsgeschwindigkeit nur in der Randschicht Martensit, im Inneren entsteht je nach Materialdicke Bainit (Zwischenstufengefüge) bzw. Perlit. Unlegierte Stähle haben deshalb nur eine rund 5mm tiefe, gehärtete Randschicht, der Werkstückkern wird zunehmend weicher. Legierte Stähle härten überwiegend durch.³⁴

Die Darstellung in der Abbildung 15 zeigt die Phase einer von der Glühzeit abhängigen, vollständigen Austenitisierung (isothermes ZTA-Schaubild) und die Phasenumwandlung bei steter Abkühlung (kontinuierlichen ZTU-Schaubild) am Beispiel eines unlegierten Stahls mit 0,45% C. Sie zeigt schematisch eine Prozessführung, wie sie bei technischen Wärmebehandlungsprozessen durchgeführt wird.

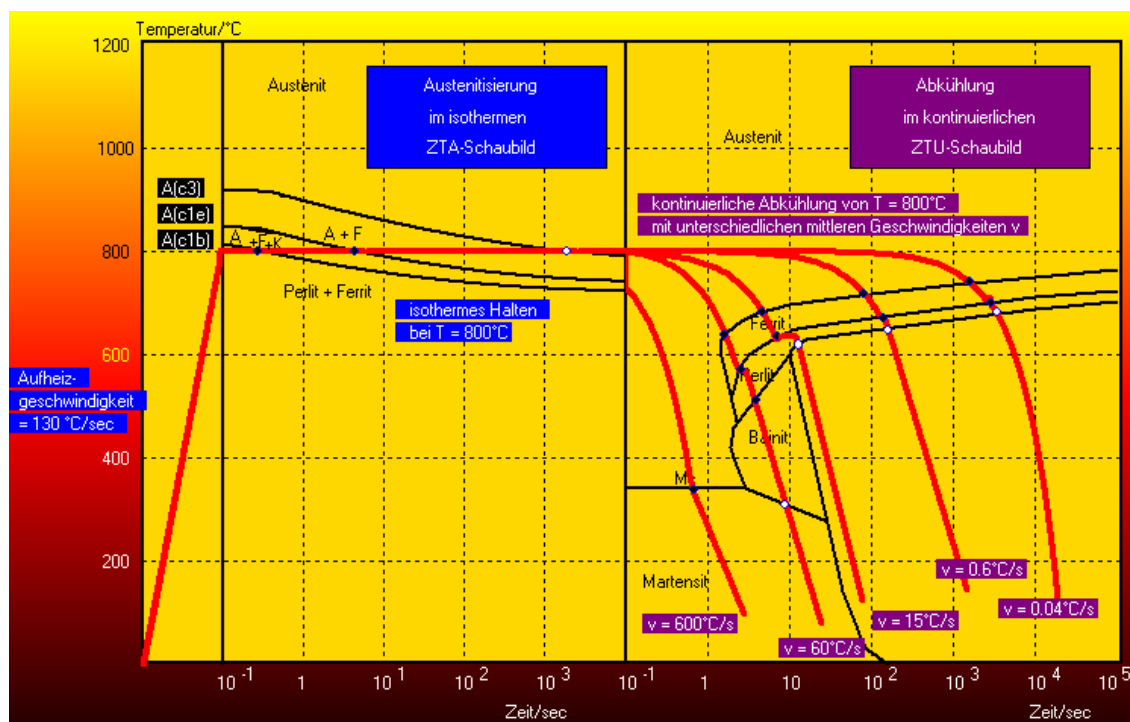


Abbildung 15: kombiniertes ZTA- und ZTU-Schaubild eines C45³⁵

³⁴ Bartenschlager & Co: Fachkunde Metall – Mechanische Technologie, S. 306

³⁵ Dressel P.: Programm „Grundlagen der Wärmebehandlung“, 2001

- Aufhärtung der Schweißnaht in der Wärmeeinflusszone

Beim Schmelzschweißen erfolgt die Verbindung zweier Werkstücke durch das Aufschmelzen der Werkstückränder und möglichem Zusatzmaterial, welches im aufgeschmolzenen Zustand zwischen den aufgeschmolzenen Werkstückrändern eingebracht wird. Die Zonen a und b in der Abbildung 16 stellen das Schweißgut und die aufgeschmolzene Zone des Grundmaterials dar. Sie sind flüssig geworden. Die Zone c erfährt dabei eine hohe Erwärmung, verbunden mit einer Grobkornbildung und einer damit einhergehenden Aufhärtung. Schweißwärme, die bis zur Zone d gelangt, verursacht im Grundmaterial eine feinkörnige Rekristallisation. In der angrenzenden Zone e ist die Schweißwärme nicht mehr ausreichend für eine Umkristallisierung, jedoch kann sie Gefügeveränderungen wie Zusammenballungen des Perlits hervorrufen. Durch Normalglühen lassen sich die oben angegebenen Gefügeveränderungen vollständig beseitigen.³⁶

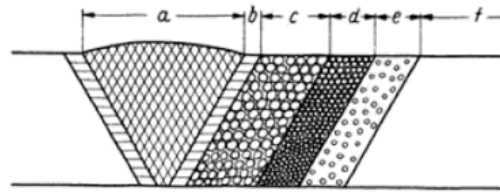


Abbildung 16: Schweißnaht mit WEZ³⁶

2.2.5. Vergüten

Die Norm EN 10025-1 beschreibt das Vergüten als Härten und Anlassen bei höherer Temperatur, um die gewünschte Kombination der mechanischen Eigenschaften, insbesondere hohe Zähigkeit und Duktilität, zu erreichen.

Bauteile, die für höhere Belastungen oder stoß- bzw. vibrationsbeaufschlagten Belastung vorgesehen sind, benötigen hohe Festigkeit bei gleichzeitig grosser Zähigkeit.



Abbildung 17: C45 im vergüteten Zustand³⁷

³⁶ Fritz Stüssi, Entwurf und Berechnung von Stahlbauten, Erster Band: Grundlagen des Stahlbaus, 1958, S. 136

³⁷ Dressel P.: Programm „Grundlagen der Wärmebehandlung“, 2001

Diese Eigenschaften erzielt man bei den dazu geeigneten Vergütungsstählen durch eine Wärmebehandlung die sich aus Härten und anschließendem Anlassen auf Temperaturen, je nach verwendeter Stahlgüte, zwischen 500°C und 700°C zusammensetzt. Diese Wärmebehandlung wird auch als Vergüten bezeichnet. Vergütet werden z.B. Getriebe- und Kurbelwellen, Schrauben, Hebel, Bolzen, Gestänge.

Die Anlasstemperaturen beim Vergüten liegen mit 500°C bis 700°C deutlich höher als beim Anlassen nach dem Härten. Zum Vergüten werden unlegierte und legierte Stähle gleichermaßen verwendet. Bei legierten Stählen mit martensitbildenden Legierungselementen wie z.B. Chrom, Wolfram, Mangan und Nickel zeigt das Niedrigtemperaturanlassen wenig Wirkung auf das Gefüge, daher wird meistens sofort auf Vergütungstemperatur angelassen. Unlegierte Vergütungsstähle enthalten 0,2% bis 0,6% Kohlenstoff, legierte Vergütungsstähle zusätzlich geringe Anteile an Chrom, Molybdän, Nickel oder Mangan.³⁸

Die erreichbaren Festigkeiten durch Vergüten betragen bei unlegierten Stählen bis zu 1000 N/mm², bei legierten Stählen bis zu 1400 N/mm².³⁹

- Vergütungsschaubild

Der Stahl ist nach dem Härten sehr hart und fest, aber auch spröde und bruchempfindlich. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Zugversuchs zeigt sich keine eindeutige ausgeprägte Streckgrenze mehr, die Hook'sche Gerade (Bereich der elastischen Dehnung, der proportional zur Spannung ist) und die Zugfestigkeit nimmt deutlich zu, die Bruchdehnung fällt auffallend gering aus.

Durch das nachfolgende Anlassen vermindern sich Härte, Zugfestigkeit und Streckgrenze. Die Zähigkeit und die Bruchdehnung nehmen zu. Die mechanischen Eigenschaften, die ein Stahl durch das Anlassen erhält, können aus seinem Vergütungsschaubild abgelesen werden.

Beispiel: Der Vergütungsstahl C45E erreicht beim Anlassen auf 550°C folgende mechanische Eigenschaften: Zugfestigkeit $R_m = 730 \text{ N/mm}^2$, Streckgrenze $R_e = 390 \text{ N/mm}^2$, Bruchdehnung $A = 16\%$.

³⁸ Bartenschlager & Co: Buch Fachkunde Metall – Mechanische Technologie, 2014, S. 308

³⁹ Gomeringer & Co: Tabellenbuch Metall, 2015, S. 134

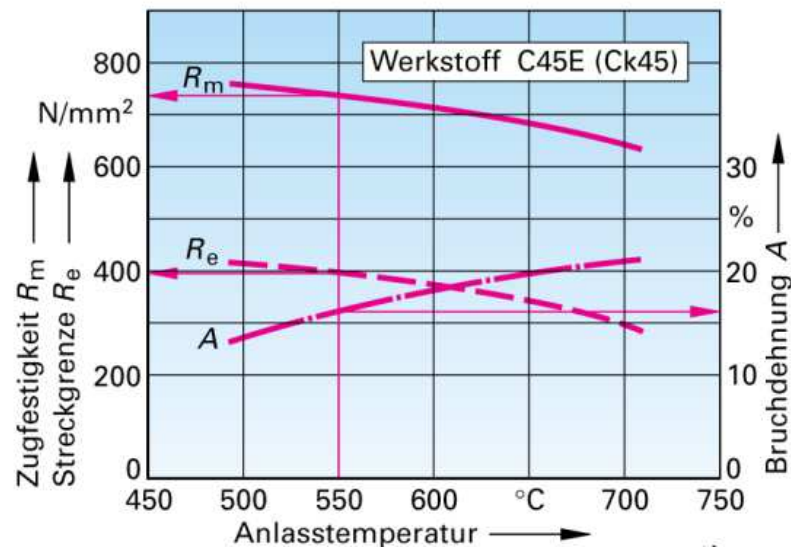


Abbildung 18: Vergütungsschaubild des Stahls C45E⁴⁰

- Innere Vorgänge beim Vergüten

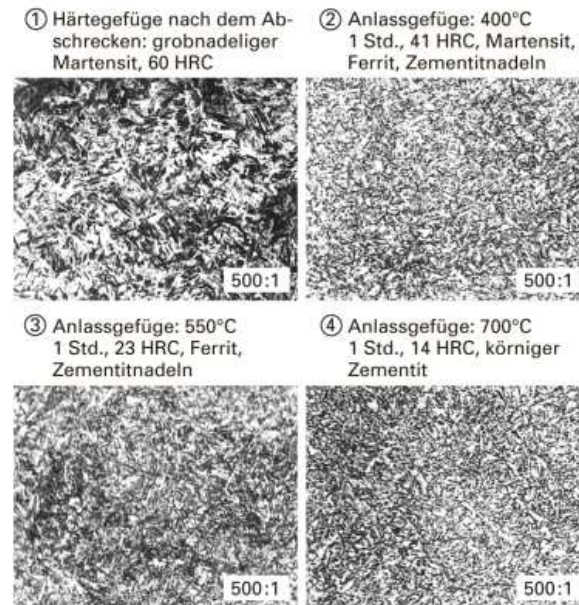
Am Beispiel des oben angeführten Stahl C45E liegt nach dem Abschrecken nadeliger Martensit in grober Gefügestruktur vor, welcher sehr hartspröde ist (Abb. 20 – 1).

Beim Anlassen auf 400°C wandelt sich ein Teil des Martensits in feinverteilten Ferrit und Zementitnadeln um, die sich im restlichen Martensit ausscheiden (Abb. 20 – 2). Mit zunehmender Anlasstemperatur schreitet der Martensitzerfall voran.

Beim Anlassen auf 550°C wandelt sich der Martensit vollständig in Ferrit und Zementitnadeln um (Abb. 20 – 3).

Beim Anlassen auf 700°C verändern sich die Zementitnadeln zu balligen Zementitkörnern (Abb. 20 – 4).⁴⁰

⁴⁰ Bartenschlager & Co: Fachkunde Metall – Mechanische Technologie, 2014, S. 308

Abbildung 19: Gefüge nach dem Härten und Anlassen⁴¹

- Wärmebehandlung der Vergütungsstähle

Die Wärmebehandlungsverfahren der Vergütungsstähle sind Glühbehandlungen wie Weichglühen oder Normalglühen und Vergüten. Die Temperaturen der verschiedenen Wärmebehandlungen können Tabellen entnommen werden.

Stahl	Weichglühen	Normalglühen	Vergüten		
			Härten Wasser	Härten Öl	Anlassen
C35	650 ... 700	860 ... 890	840 ... 870	850 ... 880	540 ... 680
C45	650 ... 700	840 ... 870	820 ... 850	830 ... 860	540 ... 680
C60	650 ... 700	820 ... 850	800 ... 830	810 ... 840	540 ... 680
42MnV7	640 ... 680	860 ... 890	840 ... 870	850 ... 880	480 ... 650
38CrNiMo4	650 ... 700	850 ... 880	820 ... 850	830 ... 860	540 ... 680
41Cr4	680 ... 720	840 ... 880	820 ... 850	830 ... 860	540 ... 680
42CrMo4	680 ... 720	840 ... 880	820 ... 850	830 ... 860	540 ... 680
30CrMoV9	680 ... 720	850 ... 880	840 ... 870	850 ... 880	540 ... 680
50CrV4	730 ... 780	840 ... 970	820 ... 850	830 ... 860	540 ... 680

Tabelle 16: Wärmebehandlungstemperaturen einiger Vergütungsstähle in °C⁴²

⁴¹ Bartenschlager & Co.: Fachkunde Metall – Mechanische Technologie, 2014, S. 308

⁴² www.linn-high-therm.de/fileadmin/user_upload/pages/about_us/download/catalogues/Kleine_Fibel_fuer_den_Haerter.pdf,

Für Vergütungsstähle ist das Vergüten die Standard-Wärmebehandlung. Ziel ist es, ein Werkstück mit hoher Festigkeit und Streckgrenze sowie großer Zähigkeit zu erhalten.

Je nach Höhe der Anlasstemperatur kann mehr auf hohe Festigkeit oder mehr auf große Zähigkeit angelassen werden. Man unterscheidet deshalb hartvergütete Stähle oder zähvergütete Stähle.

Die für einen Vergütungsstahl erforderliche Anlasstemperatur zum Erreichen des gewünschten Verhältnisses von Festigkeit und Bruchdehnung kann aus Vergütungsschaubildern abgelesen werden, die von den Stahlherstellern für jeden genormten Vergütungsstahl bereitgestellt werden.⁴³

In der Norm EN 10083-2 sind zusätzlich zu empfohlenen Glüh- und Vergütungstemperaturen Richtwerte von erreichbaren Gefügehärten in Abhängigkeit vom Randabstand enthalten.

- Vergütungsvorgänge beim Mehrlagenschweißen

Wenn Schweißnähte in mehreren Lagen hergestellt werden, haben die später geschweißten Nähte Einfluss auf die bereits vorher geschweißten. Untersuchungen haben ergeben, dass die Wärmebeeinflussung in Ihrem oberen Bereich im aufgeschmolzenen bzw. teigigen Zustand, im unteren Bereich jedoch im Festzustand erfolgt. Daher handelt sich im eigentlichen nicht um ein absichtlich herbeigeführtes Vergütungsgefüge, sondern vielmehr aus abwechselnd gussähnliche und umkörnungsartige Gefüge. Die ungünstige Inhomogenität mit seiner möglicherweise ungünstigen Auswirkung auf die Dauerfestigkeit bleibt ohne zusätzliche Wärmebehandlung auch bei Mehrlagenschweißungen bestehen.⁴⁴

- Kohlenstoffäquivalent

Die kritische Abkühlgeschwindigkeit ist eine reine Werkstoffkenngröße. Für gute Schweißbeugung sollte sie möglichst hoch sein. Legierungselemente wie Cr, Mn, oder Ni setzen sie deutlich herab, woraus sich eine erhöhte Aufhärtungsneigung in der WEZ ergibt. Dies bedeutet, dass die Schweißbarkeit von Stählen durch diese Legierungselemente negativ beeinflusst wird.⁴⁵

⁴³ Bartenschlager & Co: Buch Fachkunde Metall – Mechanische Technologie, 2014, S. 309

⁴⁴ Schmidtman E., Thinnies D.: Einfluß der thermischen Behandlung beim Ein- und Mehrlagenschweißen auf die Gefügebildung und Bruchzähigkeit von simulierten und geschweißten Proben, 1977, S. 6

⁴⁵ Ruge J.: Handbuch der Schweißtechnik: Band 1: Werkstoffe, 2. Auflage, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 1980, S. 98ff.

Zur Beurteilung ebendieser Aufhärtungsneigung wird das Kohlenstoffäquivalent herangezogen. Es gibt die Menge an Kohlenstoff an, die der Aufhärtungsneigung der verschiedenen Legierungsbestandteile gleichkommt.

$$C_{\text{äqu}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15}$$

Formel 2: CEV nach EN 10025-2⁴⁶

Diese häufig verwendete Formel findet bevorzugt Einsatz bei C-Mn-Stählen aufgrund der längeren Abkühlzeiten ($t_{8/5} = 10\text{s}$). Für Feinkornbaustähle oder höher legierte Stähle wird eine alternative Formel bevorzugt, da diese Stähle meist mit geringerer Wärmebringung und niedrigeren Vorwärmtemperaturen geschweißt werden. Daher werden sie auch mit kürzeren Abkühlzeiten ($t_{8/5} = 2$ bis 6s) abgekühlt.

$$C_{\text{äqu}} = C + \frac{\text{Mn}}{20} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cr}}{10} + \frac{\text{V}}{10} + \frac{\text{Cu}}{20} + \frac{\text{Si}}{25}$$

Formel 3: Kohlenstoffäquivalent nach dem IIW⁴⁶

Nach dem International Institute of Welding (IIW) gibt es für niedriggekohte, mikrolegierte Stähle mit $C < 0,25\%$ keine Notwendigkeit einer Vorwärmung.

Chemische Zusammensetzung eines S355J2+N lt. Hersteller:

C	Si	Mn	P	S	Cu
max. 0,2%	max. 0,55%	max. 1,60%	max. 0,025%	max. 0,025%	max. 0,55%

Tabelle 17: Maximalwerte S355J2+N lt. Hersteller

Cr, Mo, Ni, V ist lt. Hersteller nicht enthalten. Maximal zulässiger $C_E = 0,45\%$ lt. Hersteller nach Formel 2.

Nach der Formel 3 der IIW wäre der rechnerisch maximale $C_{\text{äqu}} = 0,335\%$.

Eine Vorwärmung ist abhängig von der durch den Schweißvorgang eingebrachten Streckenenergie.

⁴⁶ Ruge J.: Handbuch der Schweißtechnik: Band 1: Werkstoffe, 2. Auflage, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 1980, S. 99

3. Grundlagen für das Schweißen von Eisenwerkstoffe

Nach der Norm EN 14610 versteht man unter Schweißen das unlösbare Verbinden von Bauteilen unter Anwendung von Wärme und/oder Druck mit oder ohne Zusatzwerkstoff.

3.1. Entwicklung des Metallschweißverfahrens

Als ältestes thermisches Verbindungsverfahren gilt das Löten, das um ca. 3000 v. Chr. bekannt war.

Es wurden Gold, Silber und Kupfer meist für Schmuckstücke verarbeitet und nach unseren Begriffen mittels Hartlötung durchgeführt. Weichlöten dürfte bereits um 2000 v. Chr. den Griechen bekannt gewesen sein und bereits 300 v. Chr. war das Weichlöten mittels LötKolben im gesamten Mittelmeerraum bekannt. Seit der Verwendung schmiedbaren Eisens ist auch das Verbindungsschweißen als Feuerschweißen, eine Form des Pressschweißens, bekannt und wurde für die Herstellung von Waffen und Kunstgegenständen vor fast 3000 Jahren eingesetzt. Nachweislich wurde das Schweißen von Eisen um 1400 v. Chr. in Kleinasien ausgeübt.

Besonders aus dem Mittelalter gibt es zahlreiche Beispiele für hervorragende handwerkliche Leistungen auf dem Gebiet des Feuerschweißens, wie Waffen, Rüstungen und Kettenhemden. Auch das Wort „Schweißen“ wird von dieser Technik hergeleitet: man brachte die Werkstückoberfläche im Feuer zum Schwitzen (sie wurde glasig) und „schweißte“ dann die Werkstücke zusammen.

Lange Zeit war dieses Feuerschweißen das einzige Schweißverfahren, bis mit der Anwendung von Sauerstoff in Verbindung mit Brenngasen eine so heiße Flamme erzeugt werden konnte, dass eine Schmelzschweißung ohne Anwendung von Druck möglich wurde. In neuerer Zeit wird das echte Feuerschweißen in Verbindung mit dem Kunstschmieden nur noch sehr selten angewandt.⁴⁷

⁴⁷ Walther H.: Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik, 2006, S. 1.1.1. ff.

3.2. Einteilung der Schweißverfahren

Sie werden nach EN ISO 4063 (auszugsweise) wie folgt eingeteilt:

Schweißverfahren	Kurzzeichen	Kennzahl
Lichtbogenschmelzschweißen		1
Metall-Lichtbogenschweißen ohne Gasschutz		11
Lichtbogenhandschweißen	E	111
Schwerkraftlichtbogenschweißen	SK	112
Metalllichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode	MF	114
Unterschieneschweißen	U	118
Unterpulverschweißen	UP	12
UP-Schweißen mit Drahtelektrode		121
UP-Schweißen mit Bandelektrode		122
UP-Schweißen mit mehreren Drahtelektroden		123
UP-Schweißen mit Metallpulverzugabe		124
Metallschutzgasschweißen	MSG	13
Metallinertgasschweißen	MIG	131
Metallinertgasschweißen mit schweißpulvergef. Elektrode		132
Metallinertgasschweißen mit metallpulvergef. Elektrode		133
Metallaktivgasschweißen	MAG	135
Metallaktivgasschweißen mit Fülldraht	MAG	136
Wolframschutzgasschweißen	WSG	14
Wolframinertgasschweißen	WIG	141
Wolframwasserstoffschweißen	WHG	149
Plasmaschweißen (Wolframplasmaschweißen)	WP	15
Kohlelichtbogenschweißen	KL	181
Widerstandsschweißen		2
Widerstandspunktschweißen	RP	21
Rollnahtschweißen	RR	22
Foliennahtschweißen	RF	225
Buckelschweißen	RB	23
Abbrennstumpfschweißen	RA	24
Pressstumpfschweißen	RPS	25
Gasschmelzschweißen	G	3
Gasschweißen mit Acetylen-Sauerstoff-Flamme		311
Andere Schweißverfahren		7
Elektrogasschweißen	MSGG	73
Induktionsschweißen		74
Lichtstrahlschweißen	LI	75
Laserstrahlschweißen	LA	751

Tabelle 18: Ordnungsnummern für Schweißverfahren nach EN 4063 (Auszug)⁴⁸

⁴⁸ Gomeringer R. & Co.: Tabellenbuch Metall, 2015, S. 384

Bei den Schmelzschweißverfahren (z.B. beim Lichtbogen- oder Gasschmelzschweißen) werden die Bauteile an der Schweißstelle über den Schmelzpunkt hinaus erwärmt. Bei den Pressschweißverfahren (z.B. beim Reibschweißen) wird die Schweißstelle bis zum teigigen Zustand erwärmt und anschließend die zu fügenden Teile durch Zusammenpressen verbunden.⁴⁹

Die Schweißverfahren können weiter eingeteilt werden:

Nach Art des Energieträgers	Nach Art des Werkstoffes	Nach dem Zweck des Schweißens	Nach dem Ablauf des Schweißens	Nach der Art der Fertigung
z.B. Gas Strom	z.B. Metalle Kunststoffe	z.B. Verbindungs- schweißen Auftrags- schweißen	z.B. Schmelz- schweißen Pressschweißen	z.B. Hand- schweißen Automatisches Schweißen

Tabelle 19: Einteilung der Schweißverfahren⁵⁰

3.2.1. Einteilung nach Art des Energieträgers

Als Energieträger dienen feste Körper (Heizelemente), Flüssigkeiten (Schmelze bei aluminothermischen Schweißen, „Thermitschweißen“), Strahlen (Elektronen- oder Laserstrahl), Bewegungen (Reibungswärme), sowie elektrische Gasentladungen (Lichtbogen).⁵⁰

3.2.2. Einteilung nach Art des Grundwerkstoffes

Neben Metallen können auch weitere Stoffe, wie Kunststoff oder Werkstoffkombinationen, als Grundwerkstoffe in Betracht gezogen werden.⁵⁰

3.2.3. Einteilung nach Zweck des Schweißens

Der Zweck des Schweißens kann Verbinden oder Beschichten sein.

⁴⁹ Bartenschlager & Co.: Fachkunde Metall – Mechanische Technologie, 2014, S. 236

⁵⁰ Walther H.: Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik, 2006, S. 1.1.5. ff.

- **Verbinden (Verbindungsschweißen):**

Es werden zwei oder mehreren Teilen eines artgleichen Werkstoffes zu einer Einheit zusammengefügt. Es wird als unlösbar bezeichnet, da es nicht wie Schraubverbindungen mit einfachen Mitteln wieder gelöst und zusammengesetzt werden kann.

- **Beschichten (Auftragsschweißen):**

Dies ist das Auftragen eines Werkstoffes durch Schweißen um das Volumen zu ergänzen bzw. zu vergrößern, oder zum Schutz gegen korrosive bzw. verschleißende Einwirkungen von außen. Das Auftragsschweißen kann sich aus einer oder mehreren Lagen zusammensetzen, die sich meist überdecken. Abgenutzten oder neuen Werkstücken wird durch das Auftragen eine neue Form, angepasst an den Verwendungszweck, gegeben. Wenn der Grund- und Auftragswerkstoff nicht artgleich sind, wird unterschieden zwischen:

- a) Panzerungen (Schweißpanzern):

Auftragswerkstoff ist vorzugsweise verschleißfest

- b) Plattierungen (Schweißplattieren):

Auftragswerkstoff ist vorzugsweise chemisch beständig

- c) Pufferschichten (Puffern):

Auftragswerkstoffes dient zwischen nicht artgleichen Werkstoffen als beanspruchungsgerechte Verbindung

Es werden dem Bauteil im Oberflächenbereich die Eigenschaften gegeben, die möglicherweise andere sind, die der Grundwerkstoff besitzt, z.B. höhere Korrosions-, Chemikalien- oder Verschleißbeständigkeit. Das aufgeschmolzene Material des Grundwerkstoffes wird bezogen zum gesamten Schweißgut möglichst gering gehalten.⁵¹

⁵¹ Walther H.: Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik, 2006, S. 1.1.5. ff.

3.2.4. Einteilung nach Ablauf des Schweißens

Der Ablauf des Schweißens kann folgendermaßen unterteilt werden:

- **Schmelzschweißen:**

Durch eine örtlich begrenzte Erwärmung bis über die Liquiduslinie wird eine Verbindung hergestellt. Dabei fließen die in Schmelzfluss versetzten Kanten der zu verbindenden Werkstücke, sowie der eventuell verwendete Zusatzwerkstoffe ineinander und erstarren in weiterer Folge (Schweißen ohne Anwendung von Kraft mit oder ohne Schweißzusatz).

- **Pressschweißen:**

Durch eine örtlich begrenzte Erwärmung mindestens bis über die Soliduslinie, u.U. sogar bis über die Liquiduslinie, mit nachfolgendem Hämmern (Feuerschweißen beim Schmieden) oder Pressen wird eine Verbindung hergestellt (Schweißen unter Anwendung von Kraft oder mit Schweißzusatz).

3.2.5. Einteilung nach Art der Fertigung

Die Art der Fertigung wird als Mechanisierungsgrad verstanden. Dieser Mechanisierungsgrad wird im Bezug auf die Bewegungs- und Arbeitsabläufe in vier Stufen eingeteilt. Die Einteilung erfolgt in manuelles Schweißen (m), teilmechanisches Schweißen (t), vollmechanisches Schweißen (v) und automatisches Schweißen (a) (siehe Anlage 5).⁵²

⁵³ Walther H.: Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik, 2006, S. 1.1.6. ff.

3.3. Schweißbarkeit

Mit Hilfe des Begriffs der Schweißbarkeit möchte man beschreiben, wie leicht oder schwierig werden kann, z.B. eine Stahlsorte durch Schweißen zu verarbeiten. Die Schweißbarkeit ist laut DIN 8528:1973 Teil 1 vorhanden, wenn die Verbindung durch Schweißen mit dem gegebenen Schweißverfahren bei Beachtung eines geeigneten Fertigungsablaufes erreicht werden kann.⁵⁴

Das Werkstoffverhalten beim Schweißen ist keine reine Werkstoffeigenschaft, sondern lässt sich durch eine Menge an Faktoren beeinflussen, z.B. von dem angewendeten Schweißverfahren, seinem Zusatzwerkstoff, den verwendeten Gasen (bei Schweißverfahren mit Gasschutz) und von der konstruktiven Gestaltung des zu schweißenden Bauteils. Diese Einflussgrößen auf die Schweißbarkeit sind von unterschiedlicher Natur und sie sind größtenteils voneinander unabhängig.

Es ist somit bereits bei der Auslegung geschweißter Bauteile die Wechselwirkung zwischen Werkstoff, Konstruktion und Fertigung zu berücksichtigen. Die konstruktive Auslegung und das Fertigungsverfahren müssen auf den zu verwendenden Werkstoff abgestimmt werden. Die Wahl des Werkstoffes muss sich nach seiner mechanisch- und fertigungstechnologischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften richten und hat die zu erwartende Betriebsbeanspruchung in der Konstruktion zu erfüllen.

Die Konstruktion des Bauteiles muss so gestaltet werden, dass bei dem gewählten Werkstoff ein Anwenden des vorgesehenen Schweißverfahrens ohne Schwierigkeiten möglich ist. Das Fertigungsverfahren hat möglichen Einfluss auf die konstruktive Gestaltung des Bauteils, als auch die Eigenschaften des Werkstoffes. Es kann eine grundlegende Änderung der Werkstoffeigenschaften hervorrufen.

Um diesen Problemkreis zu ordnen, wurde versucht, die wichtigsten Begriffe, die mit der Schweißbarkeit eines Bauteiles zusammenhängen, zu analysieren. Dabei kann man die vom Werkstoff herrührenden Einflüsse von den Aspekten trennen, die von der Fertigung und Konstruktion ausgehen.⁵⁵

⁵⁴ Cramer K.: Qualitätssicherung in der Schweißtechnik, 1993, S.6

⁵⁵ Walther H.: Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik, 2006, S. 1.1.3.

Das Ergebnis sind die Teilbegriffe

- Schweißbeignung
- Schweißsicherheit
- Schweißmöglichkeit

die im Wesentlichen gleichgewichtige Bedeutung für die Schweißarbeit haben. Der Oberbegriff Schweißbarkeit wird deshalb heute meist durch die vorstehenden Unterbegriffe erklärt. Diese drei Eigenschaften hängen vom Werkstoff, von der Konstruktion und vom Fertigungsverfahren ab.⁵⁶

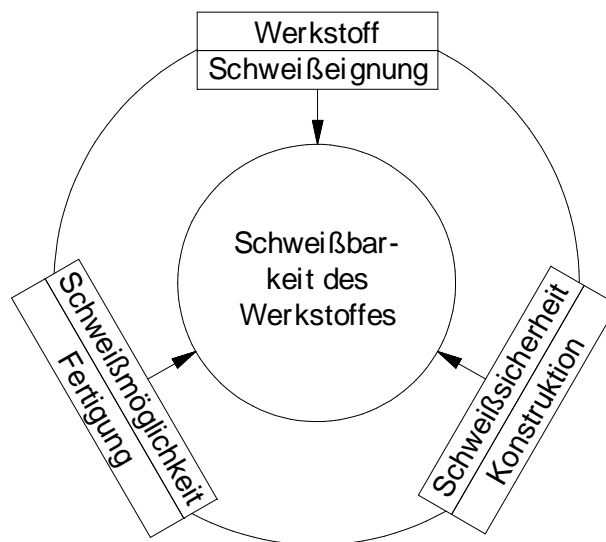


Abbildung 20: Schweißbarkeit des Werkstoffes nach DIN 8528-1⁵⁷

3.3.1. Schweißbeignung

Im DVS-Merkblatt 2902-2 ist beispielsweise die Schweißbeignung so definiert:

„Schweißbeignung ist vorhanden, wenn unter Beachtung qualitativer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte eine den Anforderungen genügende Punktschweißung hergestellt werden kann“.

⁵⁶ Schulze G.: Die Metallurgie des Schweißens, 2010, S. 237

⁵⁷ Diltney U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2005, S. 1

Die Schweißeignung von metallischen Werkstoffen zum Schweißen ist definiert durch:

- Die Fähigkeit, die Schweißung herzustellen
- Die Fähigkeit, die Schweißung fortlaufend herzustellen
- Die Fähigkeit der Schweißung, den auftretenden Betriebsbelastungen zu widerstehen

Schweißeignung ist quantitativ schwer zu formulieren und ist für verschiedene Schweißverfahren sehr unterschiedlich.

Sie wird u.a. beeinflusst durch:

- Faktoren, die durch die chemische Zusammensetzung bestimmt werden, wie Neigungen zum Spröbruch (Gehalt der Verunreinigungen), zur Alterung (Gehalt des vorwiegend freien Stickstoffs), zur Härte (Kohlenstoffgehalt) und zu Warmrissen (Gehalt des Schwefels oder der niedrig schmelzenden Verunreinigungen)
- Metallurgische Eigenschaften, hervorgerufen durch das Herstellverfahren, wie Seigerungen, Art, Form und Verteilung von Einschlüssen, Anisotropie der mechanischen Gütwerte, Korngröße und Gefügeausbildung.
- Physikalische Eigenschaften, wie Festigkeit, Zähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Ausdehnungsverhalten und Erstarrungsintervall von Legierungen.

Die Einflüsse der Schweißeignung von allgemeinen Baustähle beim Schmelzschweißen sind im Wesentlichen:⁵⁹

- Spröbruchneigung
- Alterungsneigung
- Härtungsneigung
- Seigerungsverhalten
- Anisotropie

⁵⁹ Cramer K.: Qualitätssicherung in der Schweißtechnik, 1993, S.7

Die Schweißneigung eines Stahls steigt, je weniger diese werkstoffbedingten Faktoren bei der schweißtechnischen Fertigung zu berücksichtigen sind.

- **Spröbruchneigung**

Spröbruchneigung eines Werkstoffes bedeutet, dass dieser bei relativ niedriger Beanspruchung plötzlich und ohne vorherige Verformung versagt. Einflüsse, zusätzlich zu dem bereits oben erwähnten ungünstigen Gehalt an Verunreinigungen, die den Spröbruch begünstigen, sind:

- a. Mehrachsiger Spannungszustand
- b. Tiefe Temperaturen
- c. Hohe Beanspruchungsgeschwindigkeit

Wirken mehrere Einflüsse gleichzeitig steigt die Gefahr eines Spröbruchs. Während der Fertigung kann im Vorfeld nur der mehrachsige Spannungszustand maßgeblich beeinflusst werden. Daher gilt es, ebensolche mehrachsigen Spannungszustände zu vermeiden. Folgende Maßnahmen können getroffen werden:

- a. Umformen, thermisches Schneiden und Schweißen bei niedrigen Temperaturen des Grundwerkstoffes zu vermeiden.
- b. Metallurgische und geometrische Kerbwirkung zu vermeiden.
- c. Durch geeignete Schweißfolge ein ungehindertes Schrumpfen zu gewährleisten
- d. Zum Verringern von Spannungsspitzen dicke Querschnitte vorwärmen.
- e. Durch Spannungsarmglühen Eigenspannungen verhindern.⁶⁰

- **Alterungsneigung**

Die Neigung zur Alterung ist bei älteren Stählen zumeist im ungebundenen Stickstoff oder Sauerstoff begründet, welche langsam die Eigenschaften des Materials verändert haben.⁶⁰

⁶⁰ Cramer K.: Qualitätssicherung in der Schweißtechnik, 1993, S.7f.

So ist man sich in der Fachliteratur einig, dass Thomasstahl deutlich stärker altert als Siemens-Martin-Stahl, oder mit Aluminium desoxidierter (beruhigter) Stahl weniger altert als unberuhigter Stahl. Daher ist es heutzutage nicht mehr erlaubt, unberuhigten Stahl zu verkaufen bzw. wurden diese Stahlsorten vollständig aus dem Normungssystem der Kurznamen verbannt.

Die Alterungsneigung kann aber auch beispielsweise als eine Zunahme der Zugfestigkeit und der Härte bei gleichzeitiger Abnahme des Verformungsvermögens nach einer Kaltumformung verstanden werden.⁶¹

Abhilfen bei dieser Art von alterungsanfälligen Stahlsorten sind:

- Kaltverformungen, besonders in den Bereichen, in denen später geschweißt werden soll, vermeiden.
- Kaltverformten Bereiche des Werkstückes können vor dem Schweißen einer geeigneten Wärmebehandlung unterzogen werden.
- **Härtungsneigung**

Hierunter versteht man die Zunahme der Härte eines Stahls unter der Einwirkung von Wärme, aber insbesondere der lokalen Einwirkung der Schweißwärme. Sie steht im unmittelbaren Bezug zur Aufhärtbarkeit und Einhärtbarkeit einer Stahlsorte.

Als Indikator zur Beurteilung der Aufhärtungsneigung von un- oder niedriglegierten Stählen wird vielfach das Kohlenstoffäquivalent herangezogen. Es gibt die der Wirkung des Kohlenstoffs äquivalente Menge der Legierungsbestandteile bezüglich der Aufhärtungsneigung an.⁶²

Bei Stahlsorten die zur Härtung neigen, ist durch geeignete Maßnahmen dafür zu sorgen, dass die kritische Abkühlgeschwindigkeit nicht überschritten wird. Eine geeignete Maßnahme ist beispielsweise das Vorwärmen zum Schweißen.

- **Seigerungsverhalten**

Während der Erstarrung des Stahles kann es durch lokale Entmischungen zu Seigerungsgebiete mit hohen Anteilen der Elemente Phosphor, Schwefel und Kohlenstoff kommen. Die Schweißung wird in der Seigerungszone negativ beeinflusst.

⁶¹ Cramer K.: Qualitätssicherung in der Schweißtechnik, S.6

⁶² Ruge J.: Handbuch der Schweißtechnik: Band 1: Werkstoffe, 1980, S. 99

Abhängig ist das Seigerungsverhalten des Stahles meist von der Desoxidationsart, der der Stahl unterzogen wurde. Die Lage der Seigerungszonen ist bei geseigerten Stählen zu beachten.⁶³

- Anisotropie

Unter der Anisotropie versteht man insbesondere bei Walzerzeugnissen auftretende Richtungsabhängigkeit der mechanisch-technologischen Eigenschaften. Die Festigkeits- und Zähigkeitswerte in Dickenrichtung sind niedriger als die längs und quer zur Walzrichtung. Wenn möglich sollte durch konstruktives Gestalten vermieden werden, dass Zugkräfte senkrecht zur Blechoberfläche aufgenommen werden müssen.⁶³

3.3.2. Schweißmöglichkeit

Als Schweißmöglichkeit (fertigungsbedingte Schweißmöglichkeit) bezeichnet man den Einfluss der Fertigung auf die Schweißbarkeit. Eine saubere Vorbereitung der Schweißnahtflanken, eine fachmännische Ausführung der Schweißnaht bzw. Nachbehandlung der Schweißnaht erhöhen die Schweißmöglichkeit.⁶⁴

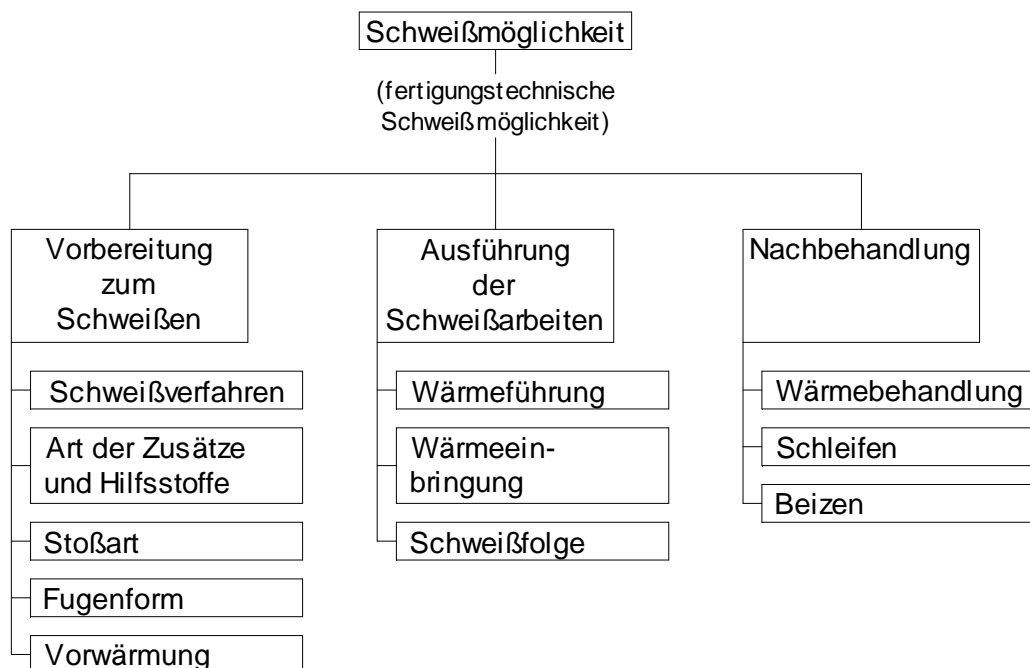


Abbildung 21: Einflussmöglichkeiten auf fertigungsbedingte Schweißmöglichkeit⁶⁴

⁶³ Cramer K.: Qualitätssicherung in der Schweißtechnik, 1993, S.6

⁶⁴ Schulze G.: Die Metallurgie des Schweißens, 2010, S. 238 ff.

Zu den Vorbereitungen des Schweißens gehört neben der Verfahrensauswahl auch die Überprüfung, ob eine Schweißnaht für den Schweißer überhaupt zugänglich ist. Beispielsweise ist ein Ausschleifen der Naht vor dem Schweißen der nächsten Lage bei Einsatz eines Engspaltverfahrens unmöglich. Größere Probleme treten in der Praxis auf, wenn geschweißte Bauteile zwingend eine Wärmenachbehandlung erfordern, das fertiggestellte Bauteil aber für den Ofen zu groß ist.

3.3.3. Schweißsicherheit

Neben dem Werkstoffverhalten bestimmt die konstruktive Gestaltung des Bauteiles die Schweißbarkeit deutlich mit. Dieser Einfluss wird auch als Schweißsicherheit (konstruktionsbedingte Schweißsicherheit) bezeichnet. Von der Schweißsicherheit einer Konstruktion spricht man, wenn die konstruktive Gestaltung einer Schweißverbindung im Bezug auf vorhandene Betriebsbedingungen ein eingeschränktes und sicheres Betriebsverhalten der Konstruktion sicherstellt. Die wichtigsten Einflussgrößen sind in der Abbildung unten dargestellt:

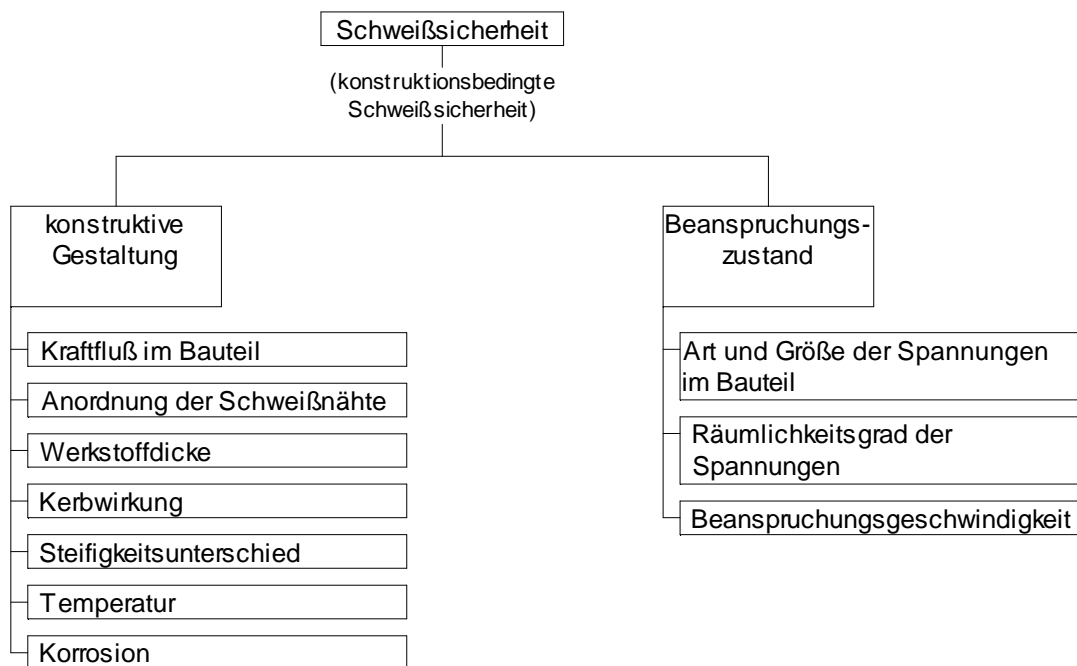


Abbildung 22: Einflussgrößen der konstruktiven Gestaltung und der Beanspruchungszustände auf die Schweißsicherheit⁶⁵

⁶⁵ Diltney U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen, 2005, S. 5

3.3.4. Abschließende Betrachtung zur Schweißbarkeit

Die Eigenschaft der Schweißbarkeit allein auf die Schweißeignung zu beschränken wäre falsch. Ebenso wie die Einteilung der Werkstoffe in schweißbar und nicht schweißbar. Dem Grunde nach ist jeder Werkstoff schweißbar; es müssen nur die dafür erforderlichen metallurgischen Rahmenbedingungen erfüllt werden. Ebendiese metallurgischen Rahmenbedingungen können jedoch in der Praxis so komplex bzw. wirtschaftlich so aufwändig sein, dass sie praktisch nicht umgesetzt werden. Durch metallurgische Maßnahmen, insbesondere durch die Wahl des richtigen Schweißverfahrens, lässt sich die Schweißeignung gut beeinflussen.⁶⁶

3.4. Schweißhauptpositionen und -nahtformen

Es kann in unterschiedlichen Positionen geschweißt werden. Diese Schweißpositionen sind entsprechend ihrer Lage, Neigung und Drehung in der EN ISO 6947 normativ geregelt.

3.4.1. Schweißnahtpositionen

- **Wannenposition (PA):** waagrechtes Arbeiten, Nahtmittellinie senkrecht, Decklage oben, (Neigung 0° - Drehung 90° oder Neigung 180° - Drehung 90°)⁶⁷



Abbildung 23: Wannenposition (PA)

- **Horizontal-/Vertikalposition (PB):** horizontales Arbeiten, Decklage nach oben (Neigung 0° - Drehung 45° oder Neigung 0° - Drehung 135° oder Neigung 180° - Drehung 45° oder Neigung 180° - Drehung 135°)⁶⁷

⁶⁶ Dilthey U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen, 2005, S. 6 ff.

⁶⁷ Walther H.: Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik, 2006, S. 1.1.47. f.

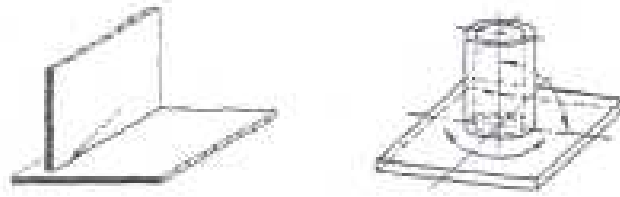


Abbildung 24: Horizontal- /Vertikalposition (PB)

- **Horizontalposition (PC):** horizontales Arbeiten, Nahtmittellinie horizontal (Neigung 0° - Drehung 0° oder Neigung 0° - Drehung 180° oder Neigung 180° - Drehung 0° oder Neigung 180° - Drehung 180°)⁶⁸

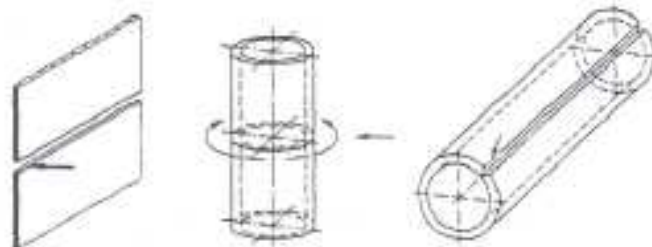


Abbildung 25: Horizontalposition (PC)

- **Horizontal-/Überkopfposition (PD):** horizontales Arbeiten, Überkopf, Decklage nach unten (Neigung 0° - Drehung 225° oder Neigung 0° - Drehung 315° oder Neigung 180° - Drehung 225° oder Neigung 180° - Drehung 315°)⁶⁸

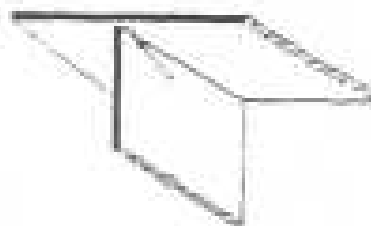


Abbildung 26: Horizontal- /Überkopfposition (PD)

- **Überkopfposition (PE):** horizontales Arbeiten, Überkopf, Nahtmittellinie senkrecht, Decklage nach unten (Neigung 0° - Drehung 270° oder Neigung 180° - Drehung 270°)⁶⁸

⁶⁸ Walther H.: Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik, 2006, S. 1.1.47. f.

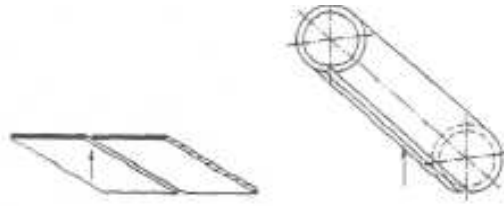


Abbildung 27: Überkopfposition (PE)

- **Steigposition (PF):** steigendes Arbeiten (Neigung 90°)⁶⁹

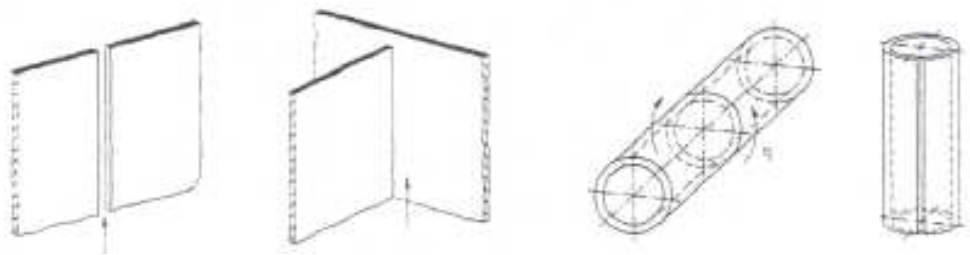


Abbildung 28: Steigposition (PF)

- **Fallposition (PG):** fallendes Arbeiten (Neigung 270°)⁶⁹

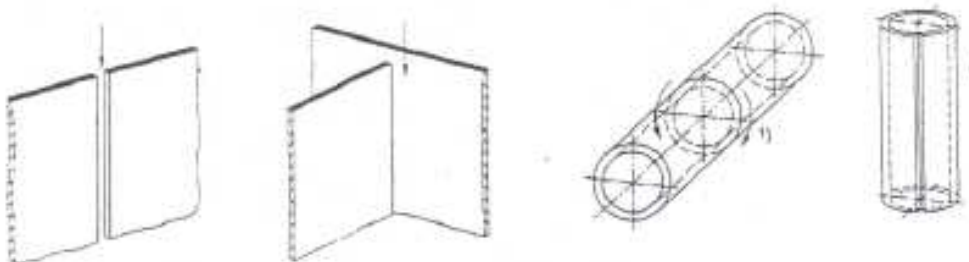


Abbildung 29: Fallposition (PG)

Anmerkungen zu den Schweißpositionen:

- Um Verwechslungen mit bestehenden Abkürzungen, z.B. „F“ für flach, zu vermeiden, ist grundsätzlich der Buchstabe „P“ für Position dem Kurzzeichen voranzustellen, um die „Hauptposition“ anzugeben.
- Grenzabmaße für die Hauptposition sind in dieser Internationalen Norm nicht festgelegt, da sie von den verschiedenen angewandten Schweißverfahren abhängen.⁶⁹

⁶⁹ Walther H.: Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik, 2006, S. 1.1.47. f.

3.4.2. Schweißnahtarten

Die Schweißnahtarten sind in der EN 2553:2014 dargestellt (siehe Anlage 6). Dies sind unter anderem Kehlnähte, Schlitznähte, Stumpfnähte, Lochschweißungen und Hohlkehlnähte. Stumpfnähte können durchgeschweißt, oder unterbrochen geschweißt werden.

3.5. Schweißgase

Der Lichtbogen und das Schmelzbad werden durch das Schutzgas geschützt. Neben inerten Gasen, in der Regel Argon, enthält es auch aktive Bestandteile, vor allem Kohlendioxid und Sauerstoff.

3.5.1. Einteilung und Bezeichnung der Gase

- Einteilung

Die Einteilung der Gase und Mischgase erfolgt nach ISO 14175:2008 in Gruppen (Haupt- und Untergruppen), die am chemischen Gesamtverhalten des Gases orientiert sind (siehe Anhang 6). Die Hauptgruppen sind:

I:	inerte Gase und inerte Mischgase
M1, M2, M3:	oxidierende Mischgase mit Sauerstoff und/oder Kohlendioxid
C:	stark oxidierende Gase und stark oxidierende Mischgase
R:	reduzierende Mischgase
N:	reaktionsträges Gas oder reaktionsträges Mischgas mit Stickstoff
O:	Sauerstoff
Z:	Mischgase mit Komponenten, die in Tabelle 3 nicht enthalten sind oder Mischgase, deren Zusammensetzung außerhalb der in Tabelle 3 aufgeführten Bereiche liegt

Alle Hauptgruppen sind (außer Z) in weitere Untergruppen aufgeteilt, um eine feinere Unterscheidung gemäß des Reaktionsverhaltens des Gasgemisches zu erlauben.

- Bezeichnung

Der Einteilung folgt das Symbol für das Basisgas, die Symbole für die anderen Gasbestandteile in abnehmender Folge ihres Prozentgehaltes und danach die Werte für die Nennzusammensetzung in Volumenprozent, getrennt durch einen Schrägstrich.

Die Symbole sind:

C:	Kohlendioxid	H:	Wasserstoff
N:	Stickstoff	O:	Sauerstoff
He:	Helium		

Beispiel für Einteilung und Bezeichnung anhand der verwendeten Gase für das MAG-Schweißen:

Standardmäßig verwendetes Gas für den konventionellen MAG – Schweißprozess:

Mischgas mit 18% Kohlendioxid, Rest Argon:

Handelsbezeichnung: CORGON 18

Einteilung: ISO 14175 – M21

Bezeichnung: ISO 14175 – M21 – ArC-18

Das Zweikomponentengas erzielt vor allem beim herkömmlichen Sprühlichtbogen gute Ergebnisse. Für das Schweißen mit Rotationslichtbogen erweist sich dieses Gas als zu wenig lichtbogenstabilisierend.

Für den HL – MAG – Schweißprozess verwendetes Gas:

Mischgas mit 25% Helium, 3,1% Sauerstoff, Rest Argon:

Handelsbezeichnung: CORGON S3He25

Einteilung: ISO 14175 – M22

Bezeichnung: ISO 14175 – M22 - ArHeO-25/3

Das Dreikomponentengas wurde im Zuge des LINFAST-Konzeptes entwickelt und vorgestellt. Es erweist sich bei hohen Drahtvorschubgeschwindigkeiten (bis ca. 30m/min) als ausgezeichnet. Durch den Sauerstoffanteil ist das Schweißbad dünnflüssiger, der typische Argonfinger wird reduziert, der Einbrand etwas breiter, auch bei steilwandiger Schweißkantenvorbereitung entstehen gute Kantenaufschmelzungen auf bei leichter Brennerfehlstellung und die Schlackenbildung wird reduziert. Eine Spritzerbildung ist nicht mehr festzustellen.

Alternative Gaskombinationen für das HL-Schweißen, z.B. 92% Ar + 8% O₂, wie sie bereits in anderen Untersuchungen verwendet wurden, kommen in dieser Arbeit nicht zur Anwendung.

3.5.2. Mischgenauigkeit, Reinheit und Feuchte der Gase

Die Anforderungen an die Mischgenauigkeiten, der Reinheit und der Feuchte wurden in der ISO 14175:2008 festgelegt.

- Mischgenauigkeit

Sie beträgt 10% vom Nennwert für Komponenten mit einem Volumenanteil >5% und 0,5% absolut für Komponenten mit einem Volumenanteil von 1 bis 5%. Gaskomponenten mit einem Volumenanteil von weniger als 1% sind in der ISO 14175 nicht vorgegeben und müssen im Bedarfsfall mit dem Gaslieferanten spezifiziert werden.

- Reinheit und Feuchte:

Hauptgruppe	Reinheit [mind. Vol%]	Feuchte [max. ppm]
I	99,99	40
M1	99,90	40
M2	99,90	80
M3	99,90	120
C	88,80	120
R	99,95	40
N	99,90	40
O	99,50	40

Tabelle 20: Reinheit und Feuchte der Gase nach EN ISO 14175

3.5.3. Eigenschaften der Gase im Schweißprozess

Diese aktiven Bestandteile bewirken eine Teiloxidation des abschmelzenden Zusatzwerkstoffes und in weiterer Folge eine Stabilisierung des Lichtbogens bzw. eine leichtere Ablösung des Tropfens. Eine Verwendung reinen Argons an diesen Werkstoffen ist möglich, aber aufgrund des unruhigeren Lichtbogens und des geringeren Einbrandes weniger praktikabel. Die wesentlichen Eigenschaften der Komponenten auf den Schweißprozess sind folgende:

- CO₂
- reagiert oxidierend mit dem Werkstoff
 - zerfällt im Lichtbogen zu CO + O – Volumenanstieg verbessert Schutz
 - nach Gaszerfall oxidierende, leicht aufkohlende Wirkung
 - hohes Gaszersetzungspotential erschwert die Zündung
 - reagiert CO + O zu CO₂ – Wärmefreisetzung – Einbrandverbesserung
 - guter Wärmetransport und Reaktionswärme – gute Ausgasung des Schweißbades – porenarme Schweißnaht
 - mit steigendem CO₂ – Gehalt – erschwerte Tropfenablösung - Spritzer

- O₂
- starke oxidierende Wirkung – 2-3 mal stärker als bei CO₂
 - stabilisiert den Lichtbogen
 - verringert die Oberflächenspannung der Stahlschmelze – feinschuppige Nahtoberfläche
 - dünnflüssige Schmelze – Gefahr von Badvorlauf und Bindefehler
 - geringes Ionisationspotential – geringe Spannungen

Eigenschaften	Ar/CO ₂	Ar/O ₂	Ar/He/O ₂
Einbrand Normalposition	gut	gut	sehr gut
Einbrand Zwangslagen	sicherer mit zunehmendem CO ₂ -Anteil	kann kritisch werden wegen Badvorlauf	kann kritisch werden Badvorlauf
Thermische Brennerbelastung	geringer werdend mit zunehmendem CO ₂ -Anteil	hoch, Leistung kann wegen zu heißem Brenner eingeschränkt werden	hoch, Leistung kann wegen zu heißem Brenner eingeschränkt werden
Oxidationsgrad	steigend mit zunehmendem CO ₂ -Gehalt	hoch, z.B. bei 8% O ₂	steigend mit zunehmenden O ₂ -Gehalt
Porosität	geringer werdend mit zunehmendem CO ₂ -Gehalt	am empfindlichsten	mäßig
Spaltüberbrückbarkeit	besser werdend mit abnehmendem CO ₂ -Gehalt	gut	verbessert durch He-Anteil
Spritzer- auswurf	steigend mit zunehmendem CO ₂ -Gehalt	spritzerarm	spritzerfrei
Wärmeeinbringung	größer mit zunehmendem CO ₂ -Gehalt	am geringsten	hoch
Rissgefahr	Abkühlgeschwindigkeit niedriger, Rissgefahr durch Aufhärtung geringer	Abkühlgeschwindigkeit höher, Rissfahr durch Aufhärtung größer	Abkühlgeschwindigkeit gering, Rissgefahr durch Aufhärtung gering
Lichtbogenarten	KLB, ÜLB, SLB ILB / CO ₂ -Anteile max. 20-25% HL-KLB	KLB, ÜLB, SLB ILB HL-KLB RLB	HL-KLB HL-SLB RLB

Tabelle 21: Eigenschaften unterschiedlicher Schweißgase⁷⁰

⁷⁰ Linde Gase GmbH: Infobroschüre „1056_tfp_schweiss_formiergase550_169690.pdf“, Stand: 12.10.2017

3.6. Evaluierte Schmelzschweißverfahren

Die grundlegenden Vorgänge beim Schmelzschweißen sind:

- Reinigen der Werkstückoberflächen in der Schweißzone von Oxiden und absorbierten Gasen durch Anschmelzen und
- Vereinigen der Fügeteile in der Schweißzone beim Erstarren der verflüssigten Werkstoffe und der damit verbundenen Neubildung des Gefüges.

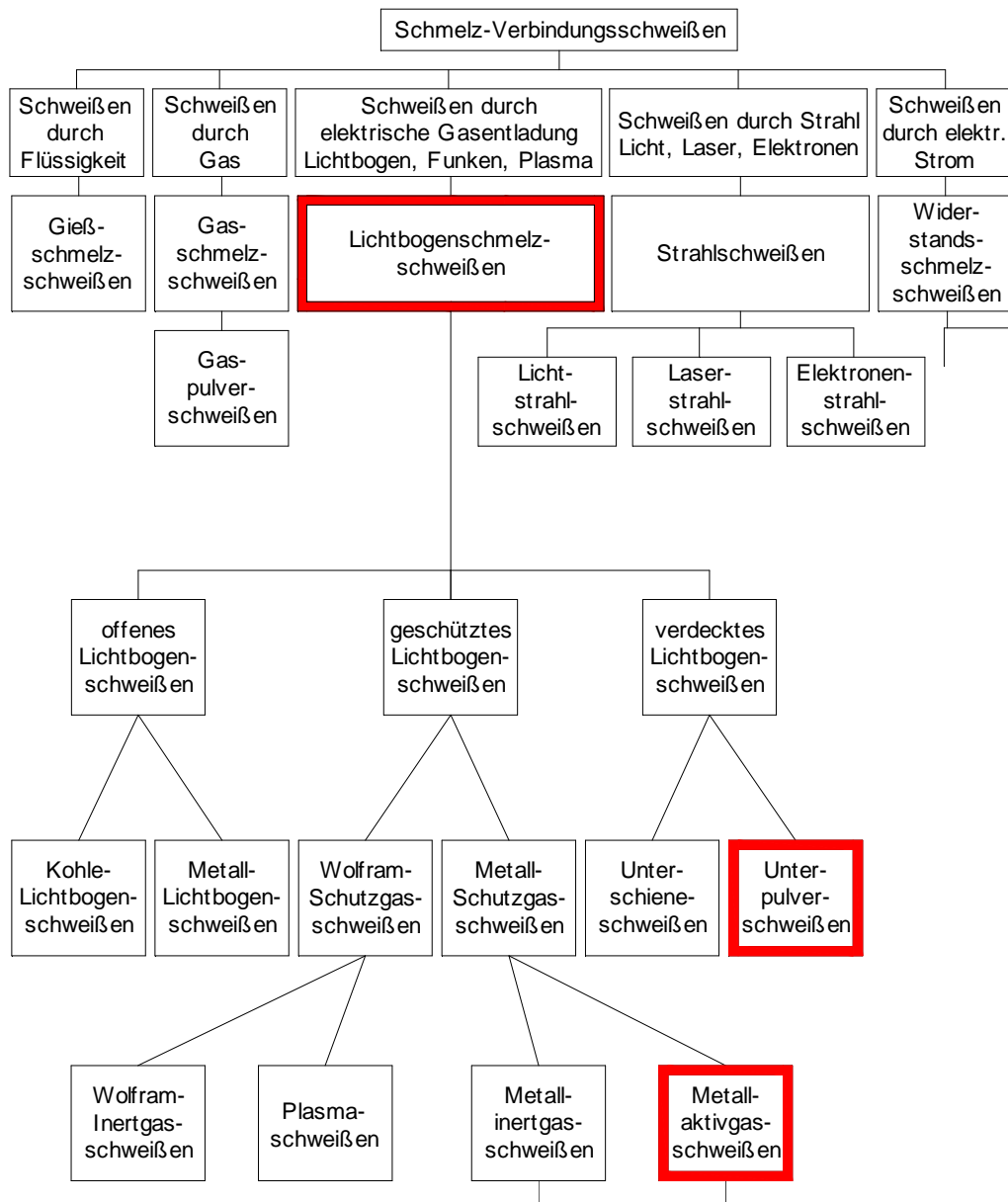


Abbildung 30: Übersicht Verbindungsschmelzschweißarten

3.6.1. Metallaktivgasschweißen

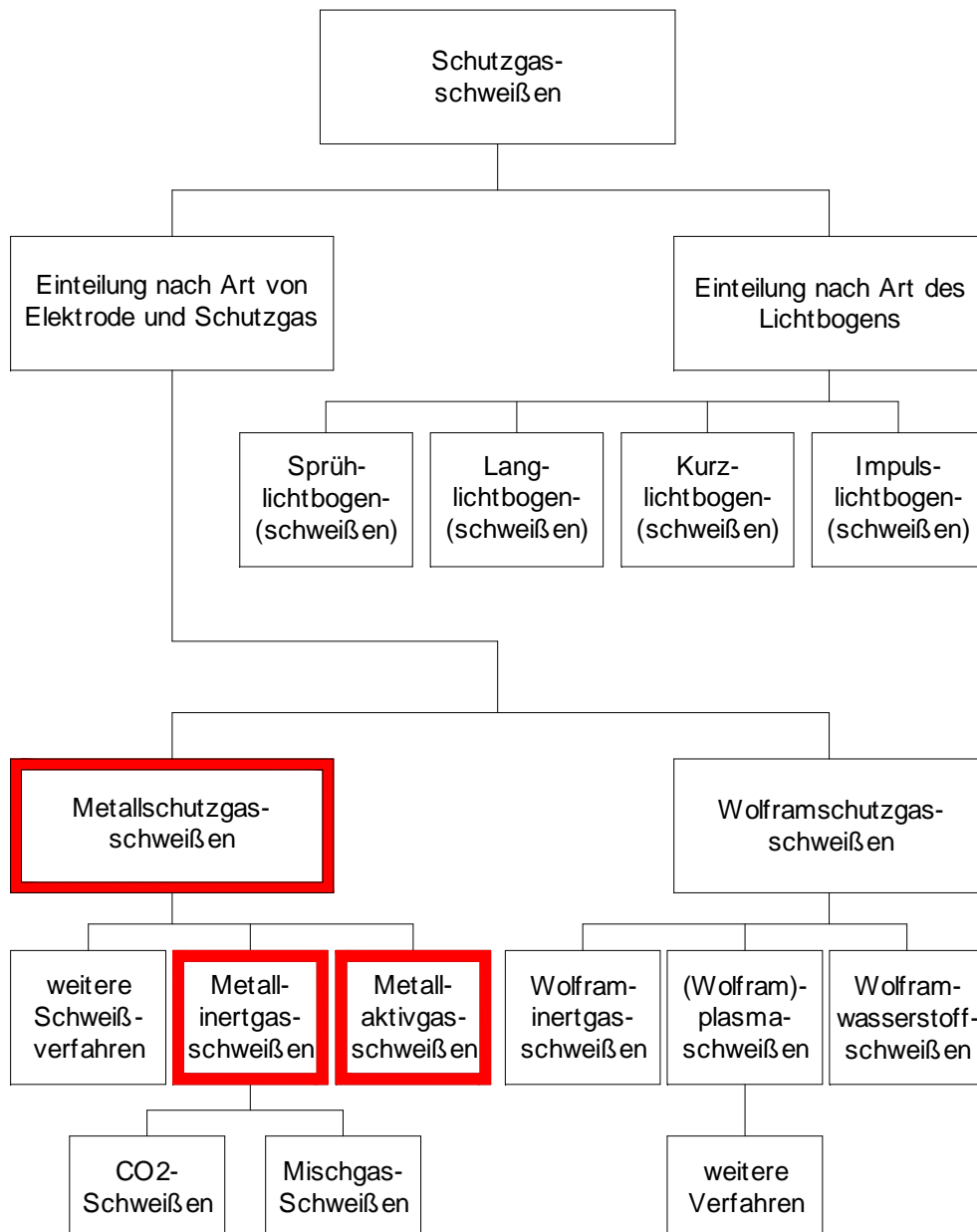


Abbildung 31: Unterteilung des Schutzgasschweißens

- Geschichte und Verfahrensprinzip

1946 entstand aus dem Kohle-Lichtbogenschweißen eine Weiterentwicklung, das WIG-Schweißen. 1948 wurde das MIG-Schweißen erfunden und 3 Jahre später wurde das Plasma- sowie das Elektro-Schlacke-Schweißen entwickelt. Zu dieser Zeit hielten neue Schweißverfahren Einzug in die Industrie. Den Anfang machte das MAG-Schweißen, anschließend das Reib- und Ultraschallschweißen. 1957 gab es die ersten industriellen

Elektroschweißanlagen, nur drei Jahre später wurde der erste Schweißroboter vorgestellt.⁷¹

Die Metall-Schutzgasschweißverfahren mit abschmelzender Drahtelektrode gehören zu den Lichtbogen-Schweißverfahren. Dabei brennt der Lichtbogen zwischen der Elektrode und dem Werkstück und wird von einem Schutzgasmantel umhüllt. Als Zusatzwerkstoff wird nackter Schweißdraht mit einem Durchmesser von 0,6mm und 1,2mm von Drahtrollen verschweißt.

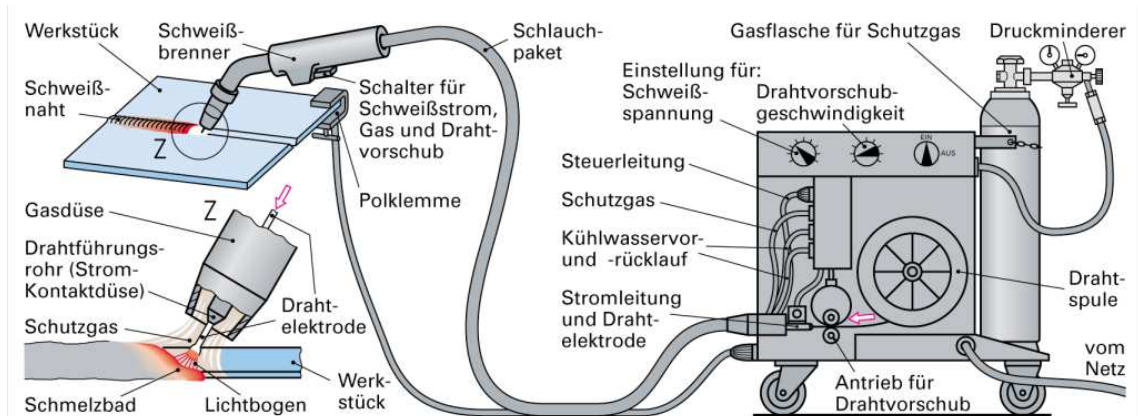


Abbildung 32: Schutzgasschweißanlage

Nach Betätigen des Brennerschalters am Schweißbrenner werden über das Steuerkabel vom Steuergerät die notwendigen Funktionen ausgelöst: Schutzgas wird zugeführt, Drahtvorschub schaltet sich ein und Stromquellenschutz freigegeben. Alle diese Komponenten sind in einem Schlauchpaket zusammengefasst und mit dem Brenner verbunden.

- Schweißgase

Beim MAG-Schweißen kommen Gasgemische auf Basis von Argon und/oder Helium mit Zusätzen von Kohlendioxid und/oder Sauerstoff zum Einsatz. Die verschiedenen Gasgemische beeinflussen neben dem Schutz der Schmelze vor der Atmosphäre folgende Anforderungen:

- Metallurgische Gütekennwerte

⁷¹ Kamps T.: Schweißen Aktuell 4.0: Schweißtechniken, Verfahren, Ausbildung und Beruf, 2015, S. 5

- Einbrandverhalten
- Schweißgeschwindigkeit
- Nahtaussehen
- Spritzerbildung
- Rauch- und Schadstoffentwicklung
- Art des Werkstoffüberganges
- Flüssigkeitsgrad der Schmelze
- Flankenbenetzung
- Lichtbogenstabilität⁷²

3.6.2. MSG Hochleistungsschweißen mit Eindraht (TIME)

- Geschichte

Der Begriff TIME Prozess (**T**ransferred **I**onized **M**olten **E**nergie) wurde von dem Kanadier John Church verfasst.

Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des herkömmlichen MAG-Verfahrens durch Erhöhung der Drahtvorschubgeschwindigkeit, unter Verwendung von speziellen Schutzgasen, bei längerem Stick-Out.

Erste Einsätze dieses neuen Hochleistungsschweißverfahrens wurden in den 80er Jahren in Japan und Kanada realisiert. 1990 wurde in

Europa das Patent zur Vermarktung übernommen. Die erstmalige Vorstellung des TIME Prozesses in Europa fand im Juni 1990 auf der Schweißmesse in Wien statt.

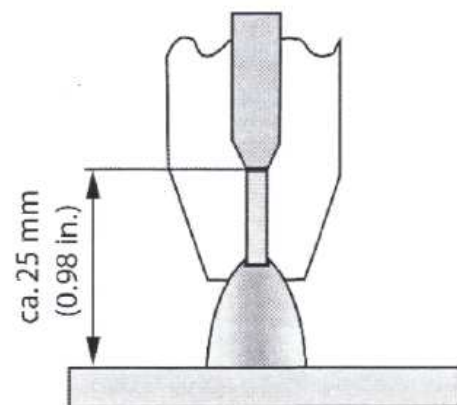


Abbildung 33: Stick-Out beim TIME-Schweißen

⁷² <http://www.airliquide.at/loesungen/business/schweissen-schneiden/gase/mag-schweissen.html#.Wawy0NSLRH1>, Stand: 28.09.2017

Der Begriff TIME steht als Synonym für das Hochleistungsschweißen. Das in den Anfängen verwendete 4-Komponentenschutzgas (0,5% O₂, 8% CO₂, 26,5% He, 65% Ar) wird heute nur mehr selten verwendet. Am Markt haben sich zum Hochleistungsschweißen vermehrt 2- und 3-Komponentengasgemische durchgesetzt.

Das MSG-Hochleistungsschweißen hat sich in der Industrie einen fixen Platz als innovatives und wirtschaftliches Schweißverfahren gesichert. Aktuell ist bereits die 3. Gerätegeneration auf digitaler Basis im Einsatz.⁷³

- **Definition des MSG-Hochleistungsschweißens gemäß Merkblatt DVS 0909-01**

Das MSG-Hochleistungsschweißen (MSG-HL) bezeichnet Schutzgasschweißprozesse, bei denen ein Massivdraht oder mehrere Massivdrähte mit Durchmessern von 1,0mm oder 1,2mm mit mehr als 15m/min Drahtvorschubgeschwindigkeit (V_0) (einzeln oder in Summe) eingesetzt wird bzw. werden. Prozesse mit größeren Drahtdurchmessern oder mit Fülldrähten, bei denen Abschmelzleistungen >8 kg/h erreicht werden, zählen ebenfalls zu den Hochleistungsprozessen. Anwendung findet das Hochleistungsschweißen überwiegend an unlegierten Baustählen und Feinkornbaustählen.

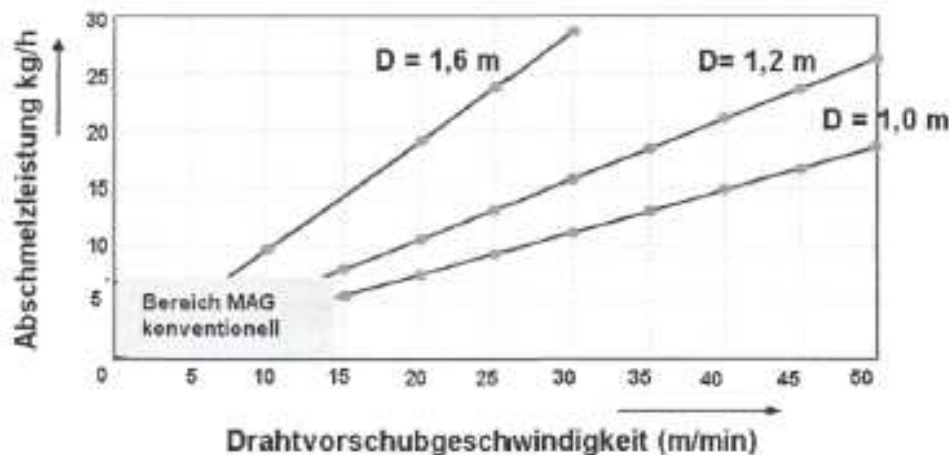


Abbildung 34: Definition MSG-Hochleistungsschweißen

- **Prinzip**

Das Hochleistungsschweißen (HL-Schweißen) mit einer Drahtelektrode ist sowohl manuell als auch vollmechanisiert einsetzbar. Die Drahtvorschubgeschwindigkeit beim manuellen HL-Schweißen ist aufgrund der zunehmenden Temperaturbelastung für den Schweißer und der Kontrollierbarkeit des Schweißprozesses begrenzt.

⁷³ Kreindl J.: Hochleistungsprozesse, 2008, S. 24

Die maximale einstellbare Drahtvorschubgeschwindigkeit kann je nach Nahtvorbereitung und Schweißposition stark schwanken, sie liegt in der Regel zwischen 15-30m/min (1,2mm Massivdraht). Im Bezug auf die maximale Schweißgeschwindigkeit liegt die Obergrenze für das manuelle HL-Schweißen bei ca. 60cm/min.

3.6.3. Unterpulverschweißen

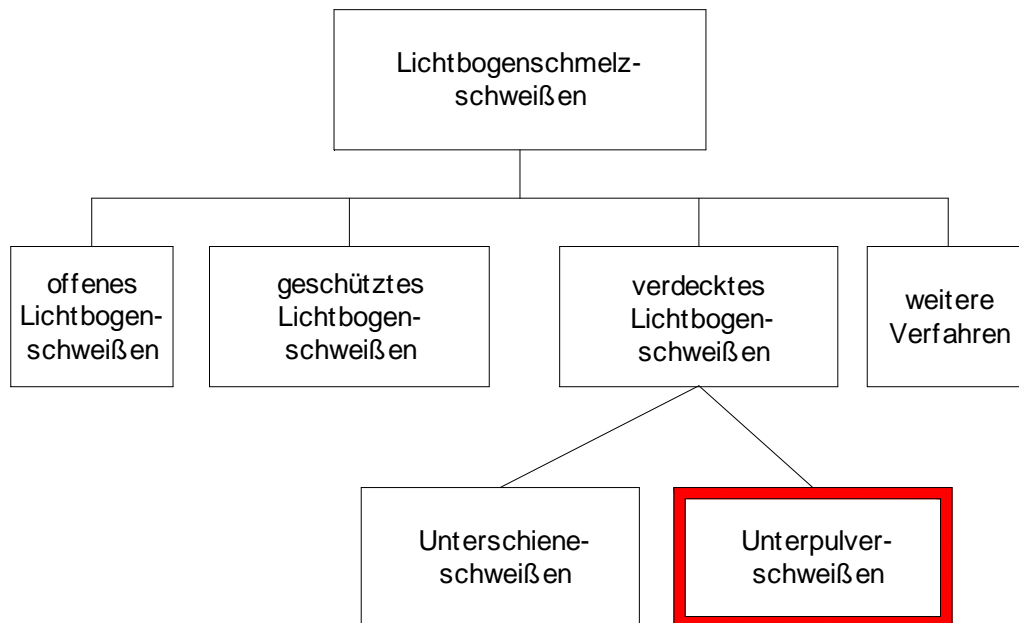


Abbildung 35: Zugehörigkeit des UP-Schweißens

- Geschichte und Verfahrensprinzip

Das Verfahren wurde Anfang der Dreißiger Jahre in den USA entwickelt. Ziel war es, die Handschweißung mit umhüllten Elektroden durch ein mechanisiertes Verfahren zu ersetzen. Die Führung und der Vorschub der Elektroden sollten also maschinell erfolgen. Die häufigen Unterbrechungen des Schweißens durch den Elektrodenwechsel sollten durch die Verwendung eines auf einer Spule aufgewickelten Drahtes vermieden werden. Dieses Aufwickeln ist aber bei einer umhüllten Elektrode nicht möglich, weil die Hülle abbröckelt. Die ersten Versuche dürften daher gewesen sein, die abgebröckelte Hülle von Elektroden aufzuschütten und einen Lichtbogen unter dieser Masse zu zünden. Das Schweißen unter abgebröckelten Elektrodenhüllen führte allerdings meist zu einem porösen Schweißgut und es mussten daher eigene Pulver und Geräte für dieses Schweißverfahren entwickelt werden.⁷⁴

⁷⁴ Ornig H.: Unterpulverschweißen, 2004, S. 1

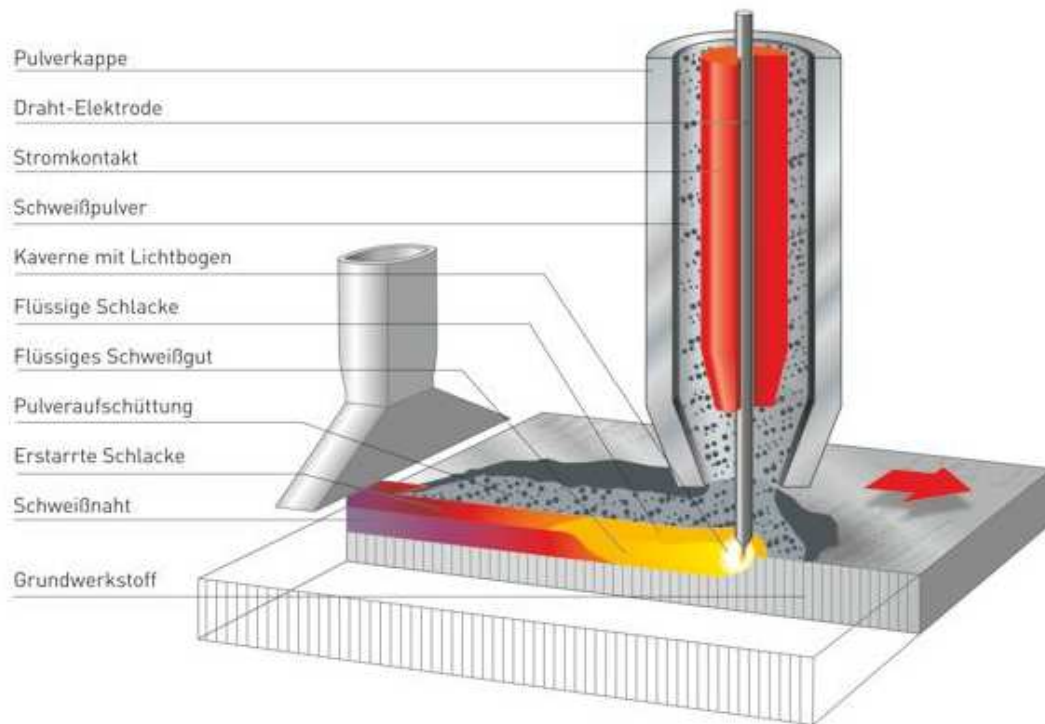


Abbildung 36: Schematische Darstellung der UP-Schweißung⁷⁵

Beim Unterpulverschweißen (UP) brennt der Lichtbogen verdeckt zwischen der mechanisch nachgeführten, blanken Drahtelektrode und dem Werkstück. Verdeckt wird der Lichtbogen von einer Schlackenkaverne, die durch Schmelzen des lose aufgeschütteten Pulvers entsteht. Die Lichtbogenatmosphäre besteht vor allem aus Metaldampf sowie aus Reaktionsprodukten zwischen Schlacke und Elektrodenwerkstoff. Wegen völliger Abschirmung der Luft und intensiver Schlackenreaktion ermöglicht das UP-Verfahren hohe metallurgische und mechanisch-technologische Güte des Schweißgutes. Die UP-Schweißung ermöglicht es, eine Drahtelektrode von z.B. 4mm Durchmesser mit 350 bis 900 Ampere abzuschmelzen, während eine umhüllte Stabelektrode mit dem gleichen Durchmesser mit etwa nur 160A, d.h. entsprechend langsamer, verschweißt werden kann. Das kommt daher, dass bei der umhüllten Elektrode zwischen Stromkontakt (Einspannende) und Lichtbogen ein 450mm langer Draht vom Strom durchflossen wird, der 1 bis 2 Minuten braucht, bis er ganz abgeschmolzen ist. Er wird durch den langen Stromdurchgang zunehmend heißer, bei zu viel Strom am Ende sogar glühend. Bei der UP-Schweißung wird ein nur ca. 20mm langes Drahtstück zwischen Stromkontakt und Lichtbogen vom Schweißstrom durchflossen. Dieses Stück schmilzt in ca. 2 Sekunden ab, hat also gar keine Zeit, um durch den Stromdurchgang heiß zu werden.

⁷⁵ <http://www.kjellberg.de/Schweisstechnik/Service/Schweisverfahren/UP-Schweissen.html>, Stand 12.10.2017

Auf diese Weise können beim UP-Schweißen viel höhere Stromstärken angewendet werden, als bei der E-Handschweißung mit Stabelektroden. Somit lassen sich hohe spezifische Abschmelzleistungen – 14 bis 30 g/Ah – erzielen. Die Abdeckung ergibt einen thermischen Wirkungsgrad $\eta \sim 1$.

Wegen des lose aufgeschütteten Pulvers wird das UP-Schweißen nur in PA und PB – Position ausgeführt. Mit einer Sondervorrichtung kann auch in PC - Position geschweißt werden.

- **Geräte**

Fahrbare Geräte besitzen ein steuerbares Fahrwerk, das alle erforderlichen Einrichtungen bis auf die Stromquelle trägt (Fahrgeschwindigkeit = Schweißgeschwindigkeit). Bei stationären Geräten sorgt eine Vorschubeinrichtung für die entsprechende Bewegung des Werkstückes. Die Drahtfördergeschwindigkeit muss so geregelt werden, dass die Lichtbogenlänge konstant bleibt: Innere Regelung bei Konstantspannungsquellen, äußere Regelung bei Stromquellen mit fallender Kennlinie. Als Stromquellen werden Transformatoren oder Gleichrichter verwendet, deren Kennlinienverlauf sich nach dem benutzten Regelprinzip richtet. Bei Gleichstrom liegt die Drahtelektrode am Pluspol.

- **Schweißpulver**

Hauptaufgabe von Schweißpulvern ist es, den Lichtbogen und das Schweißbad vor den schädlichen Einflüssen der Luft zu schützen und die Naht zu formen. Das Schweißpulver beeinflusst aber auch die Schweißeigenschaften und vor allem auch die mechanischen Güterwerte.⁷⁶

Der größte Teil des Schweißstromes fließt über den Lichtbogen, ein kleiner Teil aber auch über die Schlacke. Dieser „Schlackenstrom“ erwärmt die Nahtländer, er schmilzt diese sogar an – dies begünstigt die Ausbildung kerbfreier Nahtübergänge.

Die Höhe des Schlackenstromes hängt von der Zusammensetzung des Pulvers und den Schweißbedingungen ab. Zu hohe Schlackenströme ergeben einen breiten angeschmolzenen Bereich neben der Naht und führen zu einem pilzförmigen Nahtquerschnitt. Dieser kann das Ergebnis von Biegeproben beeinträchtigen.

Nach der Herstellung werden vor allem zwei Typen von Schweißpulvern unterschieden: erschmolzene und agglomerierte Schweißpulver.

⁷⁶ Hochreiter G.: Unterpulverschweißen in der Praxis, 1995, S. 31

Bei erschmolzenen Schweißpulvern werden stückige Minerale wie Quarz, Kalk, Mangenerz, Flußspat usw. in einem z.B. Lichtbogenofen geschmolzen. Die Schmelze wird meist in Wasser geschüttet, wodurch sie in feine Körner zerfällt. Diese werden getrocknet und abgesiebt. Zu große Körner werden gemahlen. Oder die Schmelze wird in großen Platten ausgegossen, die beim Abkühlen zerspringen und sich leicht zerkleinern lassen. So hergestellte Pulver weisen einen geringeren Wasserstoffgehalt auf.

Bei den agglomerierten Pulvern werden feine gemahlene Minerale meist zusammen mit metallischen Stoffen (Ferro-Legierungen) mit Wasserglas in besonderen Mischern zu Kügelchen gemischt, getrocknet und abgesiebt.

Eigenschaft	erschmolzenes Pulver	agglomeriertes Pulver
Korn – Aufbau	homogen	porös
Kornfestigkeit	hoch	mittel
Feuchtigkeitsaufnahme	gering (nur an der Korn-Oberfläche)	hoch (auch im Korn-inneren)
Rücktrocknungstemperatur	200 – 300°C	300 – 400°C
Zusatz von Metallen (Ferrolegierungen, Desoxidationsmittel)	nicht möglich	möglich
Schüttdichte	höher	niedriger (Ausnahme: hoher Metall-Gehalt)
Pulververbrauch	höher	niedriger (Ausnahme: hoher Metall-Gehalt)

Tabelle 22: Eigenschaften von UP-Pulver

Ein agglomeriertes Pulver ist ein heterogenes Produkt, in dem die einzelnen Bestandteile nebeneinander in veränderter Form vorliegen.

Bei relativ niedriger Trocknungstemperatur (500-600°C) ist es möglich, dem Pulver Desoxydationsmittel und Ferrolegierungen beizugeben. Letztere können dann in das Schweißbad übergehen und es z.B. mit Mn usw. auflegieren (Bei Schmelzpulvern können keine Metalle zugesetzt werden).

Agglomerierte Pulver haben im Allgemeinen ein geringeres Schüttgewicht als die glasartig erschmolzenen Pulver, wodurch der Verbrauch und die Wirtschaftlichkeit verbessert werden können.

4. Systematik der evaluierten Schweißverfahren

Die ersten drei Kapitel gehen auf die verwendeten Geräte und die Prozesseinflüsse ein, im vierten Kapitel werden die durchgeführten Testreihen erläutern und die Prozesse gegenüber gestellt.

4.1. Konventionelles MAG-Schweißgerät und seine Prozesseinflüsse

Hersteller:	Fronius
Gerätetyp:	TransSteel 3500
Strombereich:	10-350A
Einschaltdauer:	<ul style="list-style-type: none"> - 350A – 40% ED (40°C) - 300A – 60% ED (40°C) - 250A – 100% ED (40°C)
Grundwerkstoff:	Stahl
Einsatzgebiete:	<ul style="list-style-type: none"> - Maschinen- und Apparatebau - Stahlbau - Anlagen- und Behälterbau - Metall- und Portalbau - Schienenfahrzeugbau
Drahtvorschub:	1 – 25m /min
Schweißleistung:	<ul style="list-style-type: none"> - manuell bis 35cm /min - maschinell bis 150cm /min
Eigenschaften:	<ul style="list-style-type: none"> - Volldigitale Inverter-Stromquelle - Mikroprozessorsteuerung - Stromquelle ist mit einem digitalen Signalprozess gekoppelt - Schlauchpaket 3,5m - Schweißbrenner MTG 3500 S - Fahrwagen PickUp 5000



Abbildung 37: TransSteel 3500



Abbildung 38: Schweißbrenner MTG 3500S

- Einflüsse des Stick-Outs auf das Einbrandverhalten

Mit Veränderung des Stick-Outs lassen sich Einfluss auf die anzuwendende Stromstärke bzw. auf die mögliche Schweißgeschwindigkeit nehmen. Bei gleichbleibender Stromstärke lässt sich bei höherem Stick-Out die Schweißgeschwindigkeit bei gleichbleibender Einbrandtiefe deutlich erhöhen.

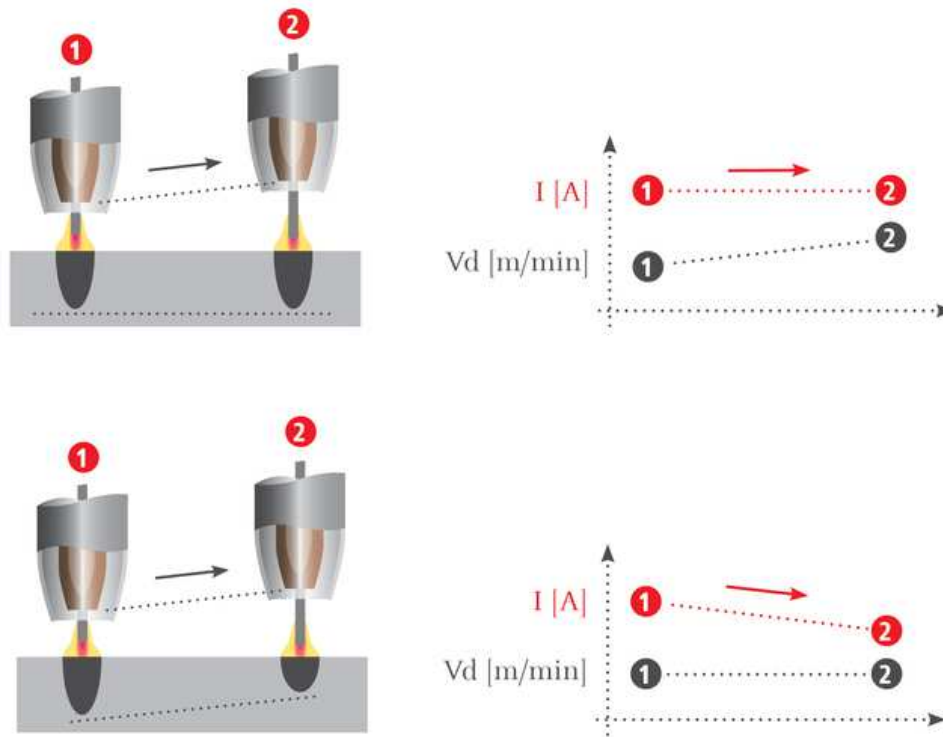


Abbildung 39: Zusammenhang Stick-Out – Einbrandtiefe⁷⁷

Alternativ kann man bei gleichbleibender Schweißgeschwindigkeit die Stromstärke reduzieren. Allerdings nimmt der Einbrand ebenfalls deutlich ab.

- Einflüsse der Schweißnahtform und –größe auf die Stromstärke und die Spannung

Grundsätzlich gibt die Schweißnahtform die Berechnungsgrundlage für den theoretischen Schweißnahtquerschnitt vor. Bei einer Kehlnaht definiert sich die Geometrie durch folgende Abmessungen.

⁷⁷ <https://www.bauforum.at/metall/mehr-kontrolle-beim-impulslichtbogenschweissen-64470>,

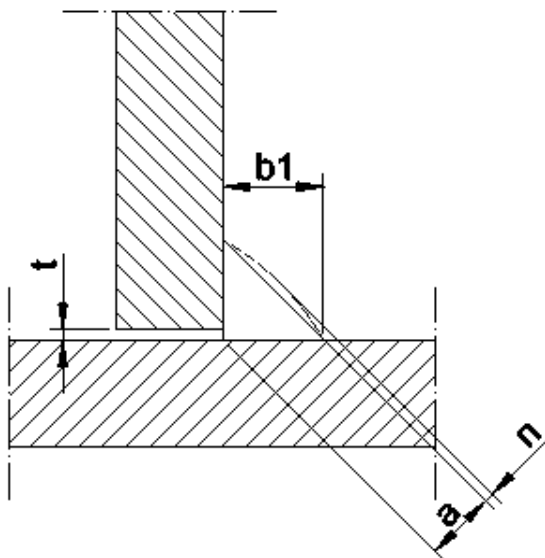


Tabelle 40: wichtige Kehlnahtabmessungen

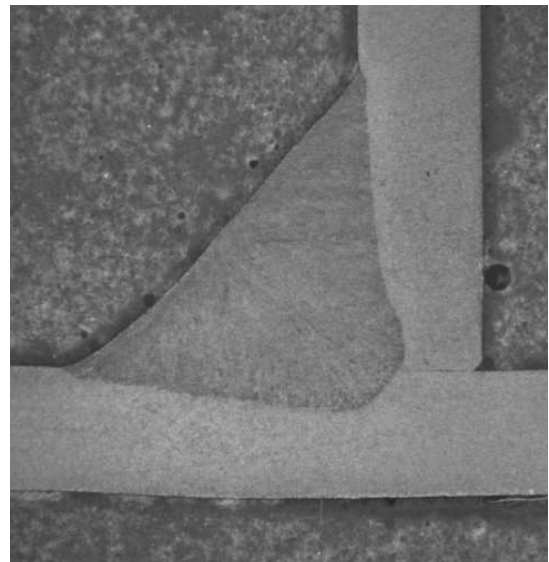


Tabelle 41: Schliffbild einer Kehlnaht

Geometriedaten für Schweißnahtgrößen							
Nahtgröße a [mm]	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
Spalt t [mm]	1	1	1	1	1	1	1
Nahtüberhöhung n [mm]	0,5	0,5	1	1	1,5	1,5	1,5
Schweißnahtbreite b1 [mm]	5,66	6,36	7,07	7,78	8,49	9,19	9,90
Nahtfläche A [mm ²]	22,27	27,28	32,81	38,84	48,15	55,39	63,16

Tabelle 2323: theoretische Abmessungen von Kehlnähten

Bei einer V-Naht wird nach EN 9692-1 folgende Geometrie für das MAG-Schweißen empfohlen:

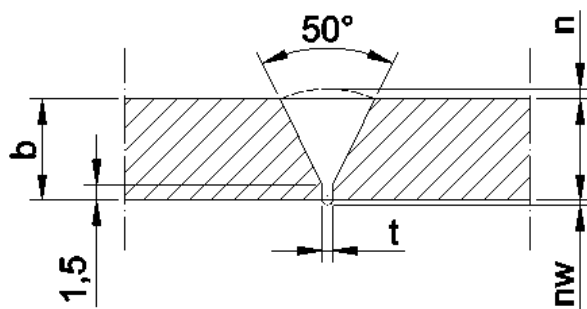
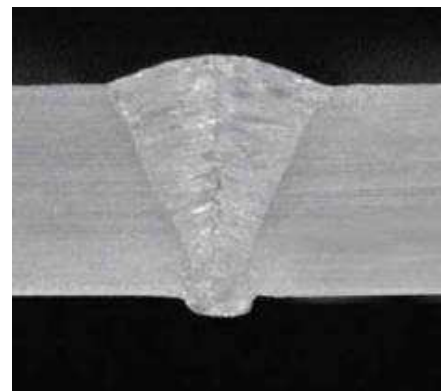


Abbildung42: wichtige Abmessungen der V-Naht



Normativer Öffnungswinkel: 40 – 60°

Abbildung43: Schliffbild einer V-Naht

Geometriedaten für Schweißnahtgrößen					
Nahtgröße b [mm]	4	5	6	8	10
Spalt t [mm]	0,5	1	1	1	1
Steg s [mm]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Wurzelüberhöhung nw	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Wurzelüberhöhung n	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00
Nahtfläche A [mm ²]	9,12	20,0	29,26	53,49	85,34

Tabelle 24: Nahtgeometrie bei V-Nähten für das MAG-Verfahren

Neben der Schweißnahtgeometrie (Nahtfläche) nehmen Faktoren wie Schweißgeschwindigkeit oder Stick-Out Einfluss auf die Stromstärke bzw. Spannung. So braucht z.B. eine Kehlnaht $a=4\text{mm}$ mit 35cm/min geschweißt (Stick-Out ca. 13mm) eine Stromstärke von ca. 156A und eine Spannung von ca. $21,7\text{V}$. Die gleiche Kehlnaht mit gleichem Stick-Out mit 50cm/min geschweißt braucht jedoch schon ca. 214A bei ca. $23,9\text{V}$ Spannung. Mit 100cm/min geschweißt würde der Prozess bereits ca. 409A bei $31,2\text{V}$ erforderlich machen.

- Einflüsse der Gasdüse auf die Schweißsicherheit

Im Zuge der Schweißung entstehen durch Schweißspritzer Verschmutzungen an der Gasdüse des Schweißbrenners.

Abbildung 44: saubere Brennerdüse⁷⁸Abbildung 45: schmutzige Brennerdüse⁷⁸

Bei der dieser Arbeit zugrunde liegenden Testreihe wurde auf die Verschmutzung der Gasdüse besonderer Augenmerk gelegt. Sie findet in der Wirtschaftlichkeitsberechnung Niederschlag in der Vorbereitungszeit. Nach mehreren Versuchen fiel die Entscheidung für die Testreihe auf eine konische Schweißdüse mit einem Durchmesser von 13mm .

⁷⁸ http://www.schweisstechnik.at/detail/automatische-brennerreinigung-fuer-beste-schweissergebnisse_94350, Stand: 12.10.2017

- Einflüsse der Gasmenge auf den Schweißbadschutz

Wichtig bei den Schutzgasschweißverfahren ist die passende Schutzgasmenge. Zu wenig Schutzgas würde zu ungewünschten Oxidationen in der Schweißzone führen, zu viel Schutzgas führt zu starken Gasverwirbelungen und in weiterer Folge zu deutlich verringertem Schweißbadschutz, erhöhter Spritzerbildung und Gaseinschlüsse in der Schweißnaht.

In der Literatur werden Gasmengen auf Basis dieser Formel empfohlen:

$$\text{Gasmenge } V = \text{Draht } \varnothing * 10 = \text{l/min}$$

Formel 4: Schweißgasberechnung

Dies ist für den verwendeten 1,2mm Schweißdraht eine Gasmenge von 12l/min. In den Vorversuchen hat sich jedoch gezeigt, dass bereits 10l/min einen hervorragenden Schweißbadschutz bieten. Die beim Schweißen auftretenden Magnetfeldkräfte (sogenannte Lorentzkräfte) ziehen den Gasstrahl an. Untersuchungen der TU Dresden haben ergeben, dass eine kontaktröhre nahe Anströmung zu einer verbesserten Schutzgasabdeckung auch bei niedriger Gasdurchflussmenge und niedriger Stromstärke führt.

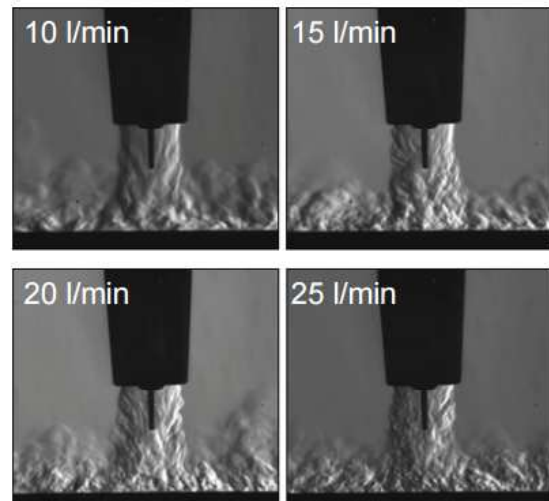


Abbildung 46: Gaswirbel bei 13mm Düse⁷⁹

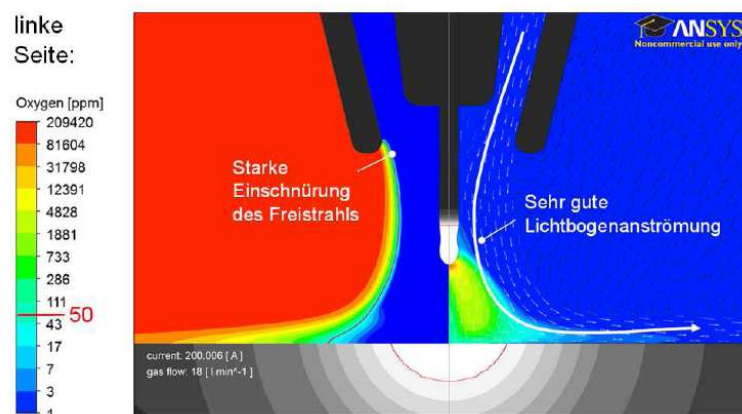


Abbildung 47: Magnetische Einwirkung auf Gasstrahl⁸⁰

⁷⁹ Schnick M., &Co.: Visualisierung der Schutzgasabdeckung beim Lichtbogenschweißen, 2012, S. 2

⁸⁰ Dreher M. & Co: Strömungstechnische Auslegung von Lichtbogenschweißbrennern“, 2012, S. 4

Das Gas streift entlang des Zusatzwerkstoffes und treibt das Atmosphärendgas vollständig aus.

Die linke Hälfte der Abbildung zeigt den Gasstrom ohne Einwirkung, die rechte Hälfte mit Einwirkung des Lichtbogens. Der Gasstrom wurde für den Test mit 18l/min fixiert.

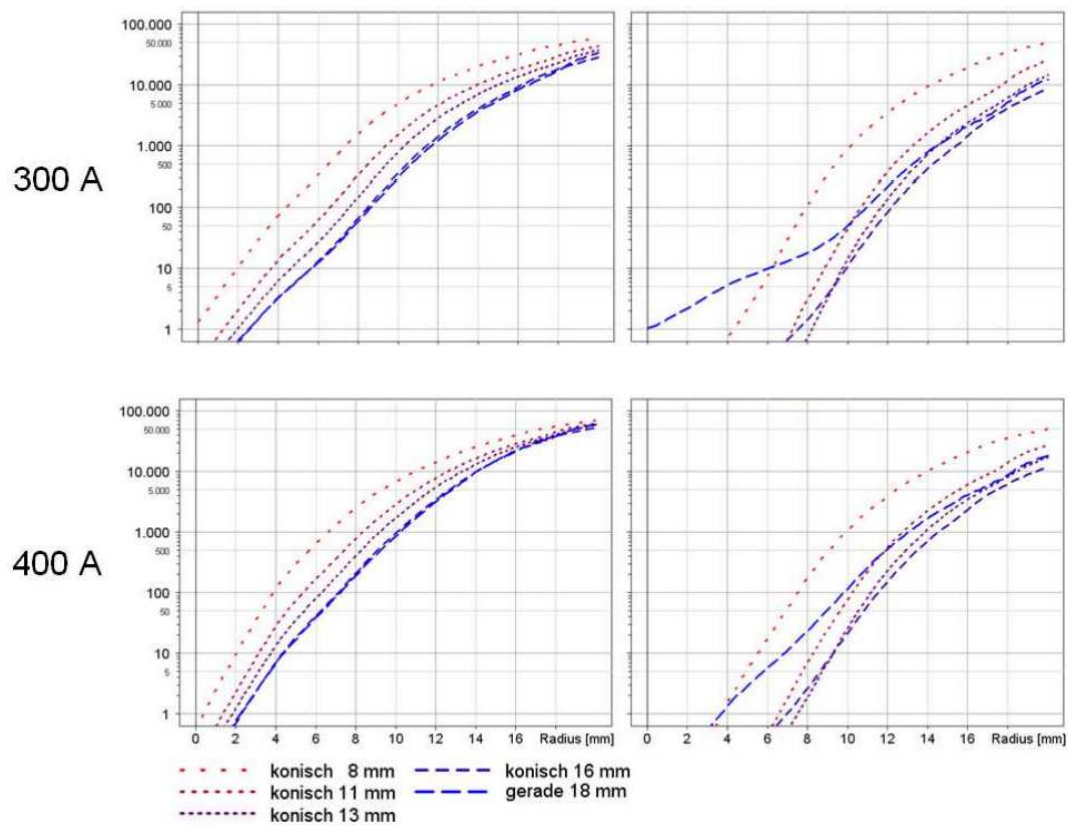


Abbildung 48: Sauerstoffkonzentration in der Gasdüsenumgebung⁸¹

Die Abbildungen der TU Dresden veranschaulichen die Sauerstoffkonzentration, abhängig von der Stromstärke und den Düsendurchmesser bei 10l/min (links) und 18l/min (rechts).

⁸¹ Dreher M. & Co.: Strömungstechnische Auslegung von Lichtbogenschweißbrennern, 2012, S. 4

4.2. HL – MAG - Schweißgerät und seine Prozeßeinflüsse

Hersteller: Fronius

Gerätetyp: Time 5000 Digital

Strombereich: 10-500A

Einschaltdauer:

- 500A – 40% ED (40°C)
- 450 A – 60% ED (40°C)
- 360A – 100% ED (40°C)

Grundwerkstoff:

- Stahl
- Aluminium
- CrNi
- Sondermetalle
- Sondermetalle (wasser gekühlte Schweißbrenner)

Einsatzgebiete:

- Anlagen-, Behälterbau
- Maschinen- und Stahlbau
- Baugewerbe / Bauindustrie
- Industrieanlagen- und Rohrleistungsbau, Montagefirmen
- Roboterschweißen
- Schienenfahrzeugbau

Drahtvorschub: > 30m /min

Abbrandleistung: > 20kg /min

Schweißleistung:

- manuell max. 60cm /min
- Maschinell max. 300cm /min

Eigenschaften:

- Inverter-Stromquelle mit höherer Fördergeschwindigkeit
- Digitale Schweißprozessregelung
- Schweißprogramme in einer Datenbank
- Schlauchpaket 3,5m
- Schweißbrenner TIME W
- Fahrwagen PickUp



Abbildung 49: Time 5000 Digital



Abbildung 50: Schweißbrenner TIME W

- Einflüsse des Stick-Outs auf die Stromstärke

Bei Erhöhung des Stick-Outs von 10mm auf 30mm kann eine Stromreduktion um ca. 30% erreicht werden.

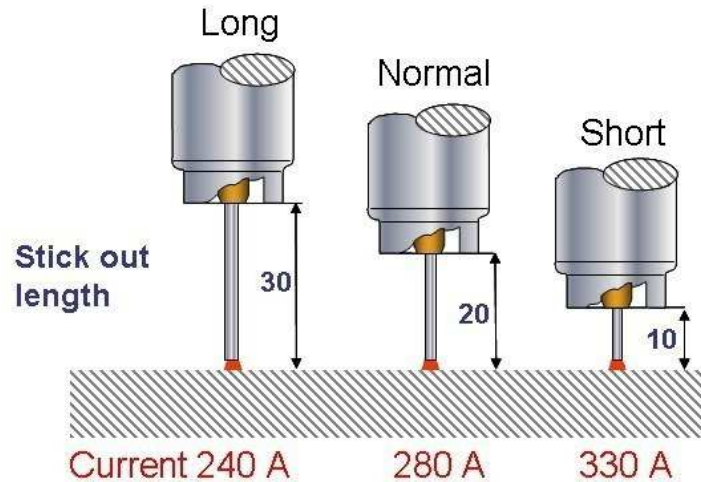


Abbildung 51: Zusammenhang Stick-Out zu Stromstärke⁸²

In der Testreihe für diese Diplomarbeit wird ein Stick-Out von 30mm angewandt. Dies ist ausreichend freie Drahtlänge um einen gleichmäßigen Rotationslichtbogen erzeugen zu können.

- Einflüsse der Stromstärke auf den Werkstoffübergang

Der Werkstoffübergang erfolgt aufgrund der hohen Stromstärke im Sprühlichtbogenbereich. Dabei sind zwei unterschiedliche Übergangsformen charakteristisch.

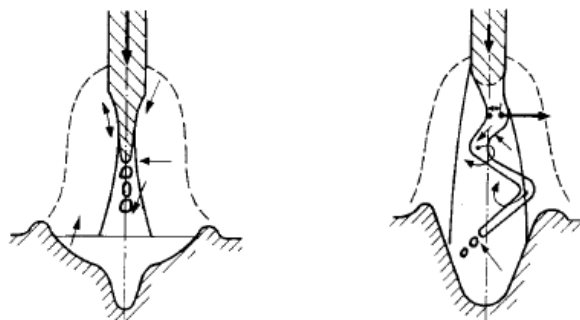


Abbildung 52: Sprühlichtbogen (links) und Rotationslichtbogen (rechts)⁸³

⁸² http://www.metallbau-magazin.de/artikel/mb_2012-01_Lichtbogenschweissen_1347696.html, Stand: 12.10.2017

⁸³ Dzelnitzki D.: Das High-Speed-Schweißen, ein zukunftsorientiertes MAG-Hochleistungsverfahren, 2000, S. 1

Der axiale Strömungsübergang bei hoher Stromstärke wird durch eine konische Elektroden spitze geprägt, von der die Plasmaströmung trapezförmig auseinanderläuft. Der hohe Plasmadruck erzeugt im Grundwerkstoff ein Einbrandprofil, das durch einen schmalen, tiefen Kern und eine flache, muldenförmige Randzone gekennzeichnet ist.

Der Rotationsübergang entsteht dagegen bei Ausbildung langer Flüssigkeitssäulen an der abschmelzenden Elektrode. Infolge sehr hoher Stromstärke und großer freier Drahtlänge wird die Temperatur am Tropfenansatz so groß, dass der Draht bereits ohne Einwirkung des Lichtbogens schmilzt. Der Kontaktrohrabstand liegt hier bei mindestens 25mm. Aufgrund eines starken magnetischen Längsfeldes rotiert diese Flüssigkeitssäule um ihre Symmetrieachse und weitet die Lichtbogensäule konisch auf. Die Tropfen gehen radial zum Grundwerkstoff über und bewirken einen relativ flachen und breiten Einbrand. Dabei spielt das angewendete Schutzgas eine große Rolle.

- Einflüsse der Drahtstärke und des Schutzgases

Das MAG – HL – Schweißen ist bevorzugt für die Drahtelektroden Durchmesser 1,0 und 1,2mm vorgesehen. Kleinere Drahtdurchmesser sind aufgrund ihrer geringen Förderstabilität weniger geeignet. Größere Drahtdurchmesser scheiden für den Rotationsübergang aus, da die zur Rotation erforderliche Temperatur am Tropfenansatz bei technisch sinnvollen freien Drahtlängen nicht erreicht wird. Die verwendeten Draht-Schutzgas-Kombinationen setzen sich aus Massiv- bzw. Fülldrahtelektroden und Dreikomponentengase zusammen. Während im Bereich des konventionellen Sprühlichtbogens (Strömungsübergang) hauptsächlich kohlendioxidhaltige Mischgase zur Anwendung kommen, wird der rotierende Sprühlichtbogen (Rotationsübergang) unter vorwiegend sauerstoffhaltigen Gasgemischen erreicht. Der Grund dafür liegt in der Eigenschaft von Argon-Sauerstoff-Gemischen, die im Werkstoffübergang eine längere Flüssigkeitssäule an der abschmelzenden Elektrode ausbilden und somit die Rotation begünstigen. Um den Arbeitsbereich des Rotationsübergangs zu nutzen, findet das Standardgas aus 96% Ar + 4% O₂ seine Anwendung. Alternativ gibt es das bereits bewährte Dreikomponentengas CORGON He25S. Seine Zusammensetzung besteht aus 72%Ar, 25% He und 3% O₂. Der Rotationslichtbogen setzt bereits bei unter ca. 22m/min Drahtvorschubgeschwindigkeit ein und ist bis über 28m/min ausgesprochen stabil. Durch das Helium verstärkt sich die Einbrandtiefe, auch bei größerer Schweißgeschwindigkeit, die Ausbildung des sogenannten Argonfingers wird weitgehend unterdrückt.

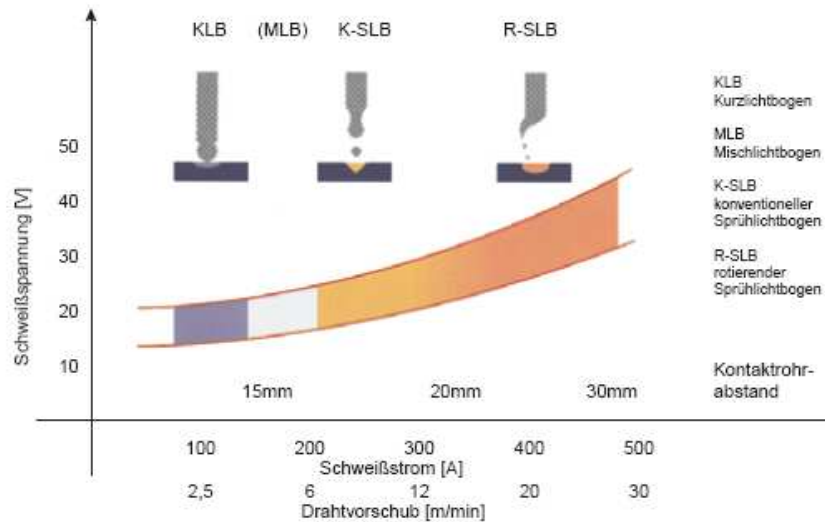


Abbildung 53: Arbeitsbereiche unterschiedlicher Lichtbögen

- Einflüsse der Gasmenge auf den Schweißbadschutz

Aufgrund des deutlich breiten Schweißbades wird eine höhere Gasflußmenge als beim konventionellen MAG-Schweißverfahren benötigt. Durch den rotierenden Lichtbogen wird das Gas zunehmend nach außen gedrängt. Die auftretenden Magnetfeldkräfte lenken das Gas deutlich weniger ab, als die Rotation des Drahtes. In den Vorversuchen hat sich eine Gasflußmenge von 18l/min mit einer konischen Gasdüse mit einem Durchmesser von 16mm bewährt.

- Einflüsse der Schweißnahtform und –größe auf die Stromstärke und die Spannung

Die Einflüsse der Schweißnahtform bzw. –größe wurde bei dem konventionellen MAG-Schweißverfahren bereits erwähnt. Die Geometriedaten der Kehlnähte verändert sich nicht, da der Stoß der Bleche einen 90° - Winkel voraussetzt. Lediglich durch den größeren Leistungsbereich des HL-MAG-Schweißgerätes lassen sich größere a-Maße in einem Durchgang erzielen.

Bei den V-Nähten ist es jedoch möglich, aufgrund der größeren Einschweißleistung und der höheren Wärmeeinbringung einen kleineren Öffnungswinkel anzuarbeiten, ohne auf eine hohe Nahtqualität verzichten zu müssen. Gleichzeitig wird das Schrumpfverhalten wegen des geringeren Schweißnahtvolumens positiv beeinflusst.

⁸³ Dzelnitzki D.: Das High-Speed-Schweißen, ein zukunftsorientiertes MAG-Hochleistungsverfahren, 2000, S. 2

Bei der V-Naht-Schweißung mit dem HL-MAG-Schweißverfahren wird folgende Schweißnahtgeometrie vorbereitet:

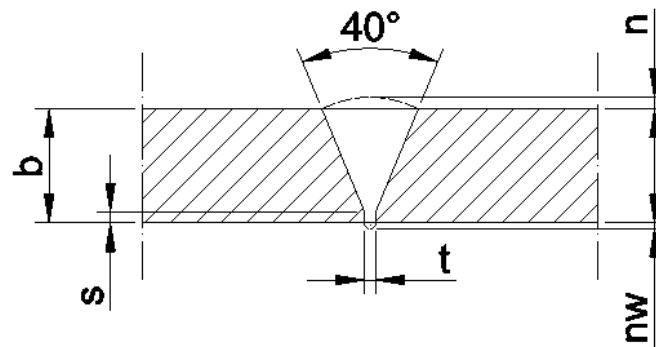


Abbildung 54: wichtige Abmessungen der V-Naht

Geometriedaten für theoretische Schweißnahtgrößen					
Nahtgröße b [mm]	4	5	6	8	10
Spalt t [mm]	0,5	1	1	1	1
Steg s [mm]	2	2	2	2	2
Wurzelüberhöhung n_w	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Wurzelüberhöhung n	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00
Nahtfläche A [mm ²]	5,84	10,31	17,43	34,29	57,09

Tabelle 25: Nahtgeometrie bei V-Nähte für das HL-MAG-Verfahren

Auch bei geringerer Nahtfläche (als bei 50° Öffnungswinkel) spielen die Schweißgeschwindigkeit bzw. das Stick-Out (wurde bereits separat behandelt) einen großen Einfluss. Der Rotationslichtbogen wird in unserer Versuchsreihe mit 50cm/min Geschwindigkeit problemlos geschweißt.

4.3. UP-Schweißgerät und seine Prozeßeinflüsse

Hersteller: ESAB

Gerätetyp: A2 Multi Trac

Strombereich: max. 800A

Einschaltdauer: - keine Angabe

Grundwerkstoff:

- Stahl
- Aluminium
- CrNi

Einsatzgebiete:

- Anlagenbau
- Behälterbau
- Maschinenbau
- Stahlbau

Drahtvorschub: max. 9m /min

Schweißleistung: 0,1 - 1,7m /min

Spulengewicht: 30kg je Drahtspule

Eigenschaften: - digitale Schweißprozesssteuerung



Abbildung 55: ESAB A2 Multi Trac

- Einflüsse auf die Raupenform und den Pulververbrauch

Während der Erstarrung einer Schweißnaht entstehen dendritische Kristalle von der Raupenwand in Richtung Schweißnahtmitte. Die Verunreinigungen mit niedrigerem Schmelzpunkt werden vor der Erstarrungsfront hergeschoben. Bei tiefen, schmalen Raupen gelangen die Verunreinigungen im schlechtesten Fall in eine senkrechte Lage, die in der Raupenmitte liegt. Dort kann durch die höhere Konzentration von Verunreinigungen ein Heißriss entstehen. Man strebt daher Schweißraupen mit etwa halbkreis-

förmiger Unterraupen an, bei der die Verunreinigungen an die Raupenoberfläche geschoben werden.

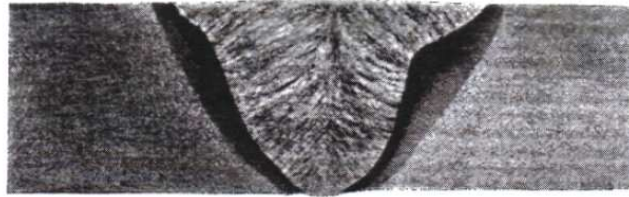


Abbildung 56: Makroschliff einer UP-Schweißung mit halbkreisförmiger Unterraupen⁸⁴

- Einflüsse von Schweißstromstärke und Lichtbogenspannung - allgemein

Die Tabelle stellt schematisch dar, wie Schweißstromstärke und Lichtbogenspannung den Einbrand, die Nahtbreite, die Abschmelzleistung und den Pulververbrauch beeinflussen. Die rechte Spalte zeigt schematisch die fertige Schweißnaht mit Schlackenhaut.

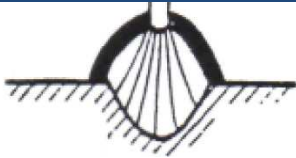



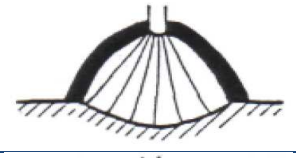

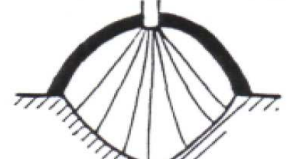

Maschineneinstellung	Ausbildung Kaverne	Ausbildung Schweißnaht
wenig Strom - niedrige Spannung		
viel Strom - niedrige Spannung		
wenig Strom - hohe Spannung		
viel Strom - hohe Spannung		

Tabelle 26: Schweißnaht- und Kavernenausbildungen am Beispiel der Elektrode Böhler EMS 2⁸⁵

⁸⁴ Ormig H.: Unterpulverschweißen, 2004, S. 5

⁸⁵ Ormig H.: Unterpulverschweißen, 2004, S. 8

- Einfluß der Schweißstromstärke (Stromdichte)

Eine Erhöhung der Stromstärke bewirkt einen kräftigeren, konzentrierteren Lichtbogen. Dies verursacht einen größeren Einbrand (ca. 1mm / 60A). Bei mehr Strom schmilzt mehr Draht ab (ca. 1,5kg /h je 100A). Bis die Nahtüberhöhung steigt. Die Nahtbreite nimmt wenig zu, ebenso die Schlackenmenge (Pulververbrauch). Weil aber die Abschmelzleistung steigt, nimmt der spezifische Pulververbrauch (kg Pulver / kg Draht) ab.

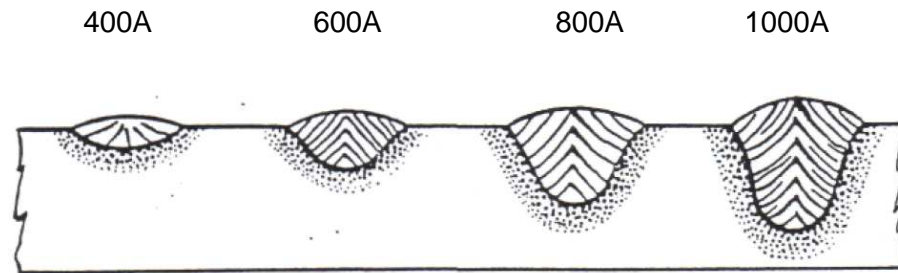


Abbildung 57: Einfluss der Stromstärke auf die Nahtausbildung⁸⁶

Die Abhängigkeit der Nahtausbildung vom Schweißstrom lässt sich in einem Diagramm so darstellen:

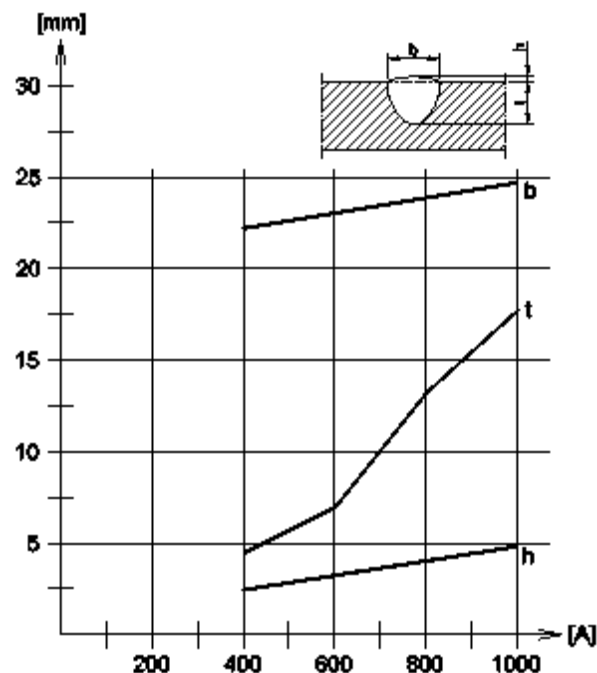


Abbildung 58: Einfluss der Stromstärke auf Nahtbreite, -tiefe und -überhöhung (Schweißspannung bei ca. 32V, Schweißgeschwindigkeit 40cm/min)

⁸⁶ Ormig H.: Unterpulverschweißen, 2004, S. 9

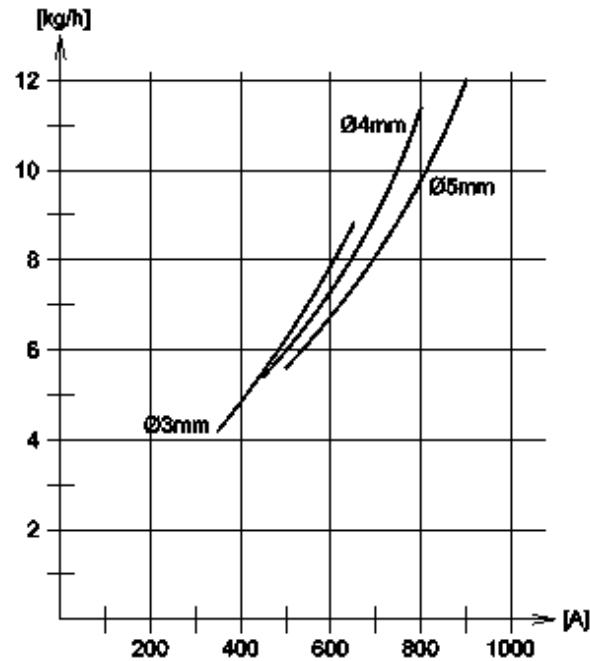


Abbildung 59: Abschmelzleistung in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser und der Stromstärke

Je nach Drahtdurchmesser muss man in einem anderen Stromstärkenbereich schweißen. Äußerste Grenzen sind:

Drahtdurchmesser (mm)	Stromstärke (A)
2	200 450
2,5	240 570
3	280 650
4	350 900
5	500 1100
6	600 1400
8	800 1750
Faustformel: $[A] = \text{Drahtdurchmesser} * (100 \dots 200)$	

Tabelle 27: Abhängigkeit der Stromstärke vom Drahtdurchmesser

Bei gleicher Stromstärke erhält man mit einem dünneren Draht einen höheren Einbrand, weil der Lichtbogen konzentrierter ist.

- Einfluß der Lichtbogenspannung

Eine Erhöhung der Lichtbogenspannung bewirkt einen größeren Abstand Drahtende – Grundwerkstoff, und in weiterer Folge einen aufgefächerten Lichtbogen. Das vermindert den Einbrand und die Nahtüberhöhung. Ebenfalls bewirkt es meist eine starke Verbreiterung der Schweißnähte und eine starke Erhöhung der Schlackenmenge. Genauer werden diese Verhältnisse in der Abbildung 61 dargestellt.

Um eine günstige Raupenform zu erzielen, schweißt man bei niedriger Stromstärke mit niedriger Lichtbogenspannung, bei hoher Stromstärke mit hoher Lichtbogenspannung.

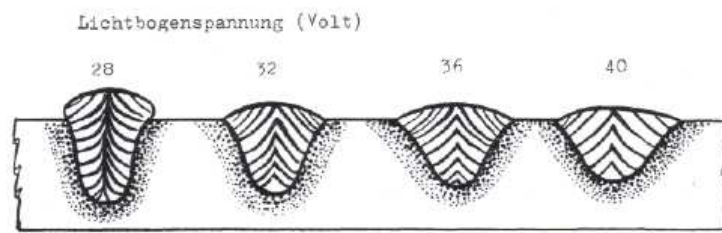


Abbildung 60: Darstellung der Nahtform entsprechend untenstehender Tabelle⁸⁷

Die Abhängigkeit von der Nahtform von der Schweißspannung lässt sich in einem Diagramm darstellen:

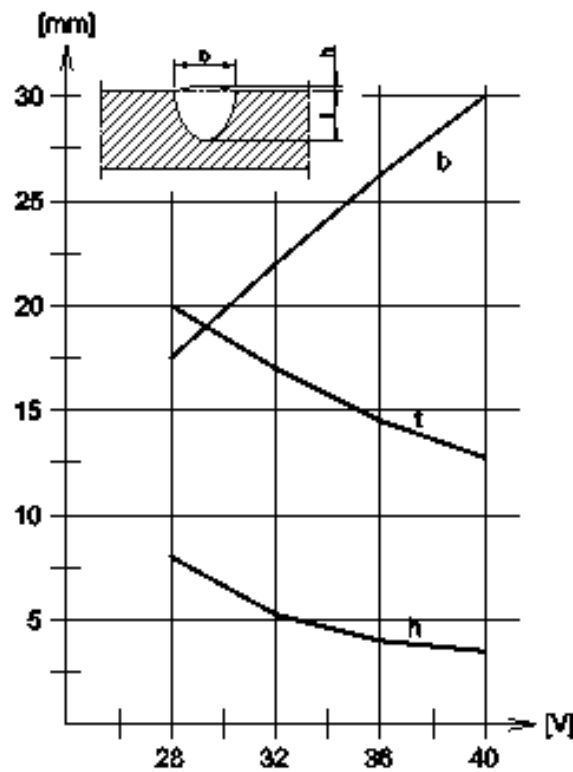


Abbildung 61: Einfluss der Lichtbogenspannung auf die Schweißnahtform

Die Abbildung 61 bezieht sich auf ca. 1000A Schweißstrom und 40cm/min Schweißgeschwindigkeit.

⁸⁷ Ormig H.: Unterpulverschweißen, 2004, S. 11

- Einfluß der Schweißgeschwindigkeit

Die Schweißgeschwindigkeit wirkt sich auf die Abschmelzleistung und den Pulververbrauch nicht aus. Die abgeschmolzene Drahtmenge verteilt sich bei Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit auf eine größere Nahtlänge. Nahtüberhöhung und Nahtbreite nehmen auf diese Weise ab. Bei zu hoher Schweißgeschwindigkeit entstanden in der Testreihe Einbrandkerben.

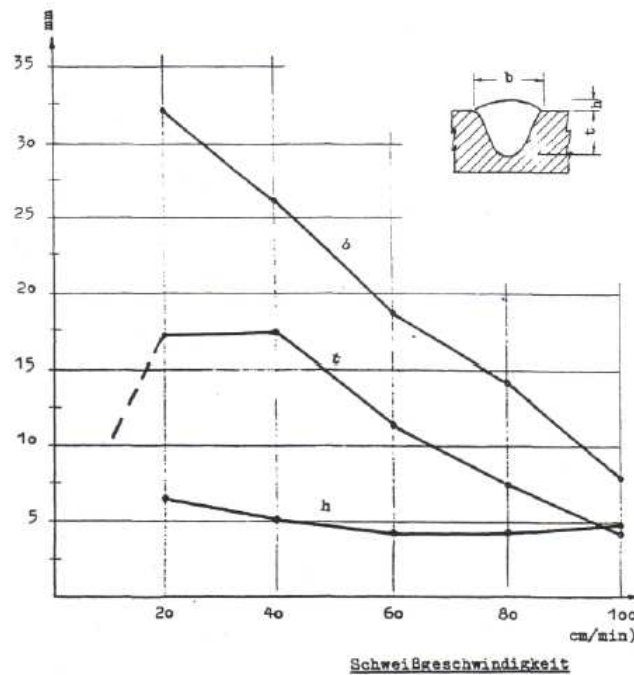


Abbildung 62: Schweißnahtbreite, -höhe und -tiefe in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit (ca. 900 A und ca. 33 V)⁸⁸

Die Einbrandtiefe erreicht ihren höchsten Wert bei Schweißgeschwindigkeiten um 40 cm/min. Mit steigender Schweißgeschwindigkeit verringert sich der Einbrand (weniger Zeit zum Aufschmelzen!) bei zu niedriger Schweißgeschwindigkeit entsteht ein zu großes Schmelzbad, das wie ein Polster wirkt, weil es unter den Lichtbogen läuft und damit die Tiefenwirkung des Lichtbogens verringert!

- Einfluß der Stromart und Polung

Grundsätzlich kann Gleichstrom oder Wechselstrom verwendet werden. Im Allgemeinen schweißt man mit Gleichstrom, Drahtelektrode an Pluspol, dies ergibt den tiefsten Einbrand und die größte Sicherheit gegen Poren (stabiler Lichtbogen).

⁸⁸ Ornig H.: Unterpulverschweißen, 2004, S. 12

Die geringere Einbrandtiefe am Minuspol wird bei der Auftragsschweißung zur Verminderung der Aufmischung des Grundwerkstoffes mit dem Draht genützt. Beim UP-Schweißen mit Wechselstrom erhält man einen mittleren Einbrand, muß aber auf Porenanfälligkeit (höherer Wasserstoffgehalt) achten.

- **Einflüsse der Schweißnahtform und -größe auf die Stromstärke und die Spannung**

Die Norm EN ISO 9692-2 empfiehlt für das UP-Schweißen folgende Fugenformen:

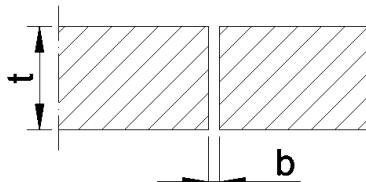
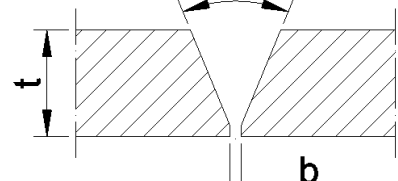
Lfd. Nr.	Werkstückdicke	Ausführung des UP-Schweißens	Fugenform Schnitt	Maße		Bemerkungen
				α	Stegabstand	
1	1,5 .. 8mm	einseitig			bis 1,5mm	
	3 .. 20mm	beidseitig				
	4 .. 15mm	einseitig			2 ... 4 mm	mit Pulverhaltevorrichtung
	12 .. 15mm	beidseitig			4 ... 8mm	
2	4 .. 20mm	einseitig		30° bis 50°	bis 3mm	Unterlage notwendig

Tabelle 28: Fugenformen für das UP-Schweißen nach EN ISO 9692-2

Bei der V-Naht-Schweißung mit dem UP-Schweißverfahren wird folgende Schweißnahtgeometrie vorbereitet:

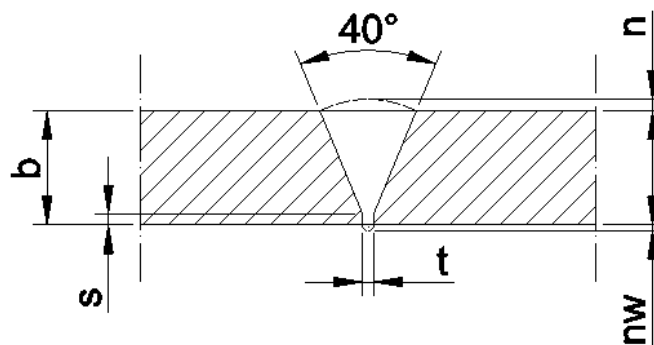


Abbildung 63: wichtige Abmessungen der V-Naht beim UP-Schweißen

Geometriedaten für theoretische Schweißnahtgrößen					
Nahtgröße b [mm]	4	5	6	8	10
Spalt t [mm]	1	1	1	2	2
Steg s [mm]	1	1	1	1	1
Wurzelüberhöhung nw	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Wurzelüberhöhung n	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Nahtfläche A [mm ²]	13,27	19,98	28,18	58,21	87,04

Tabelle 29: Geometriedaten der V-Naht für UP-Schweißen

Die Norm EN ISO 9692-2 gibt keine Empfehlungen für die Steghöhe (in der Zeichnung das Maß s) ab, daher nehmen wir in die Testreihe einen Minimalsteg von 1mm auf, verwenden aber zur Sicherheit gegen Durchstechen eine keramische Schweißbadsicherung.

4.4. Testreihen und Gegenüberstellungen

Als Referenzwerte werden zunächst Einstellempfehlungen eines Schweißgeräteherstellers verwendet um ein mögliches Optimierungspotenzial beim konventionellen MAG-Schweißgerät ausfindig zu machen. Die Tabelle wurde uns freundlicherweise von der Fa. Oerlikon zur Verfügung gestellt und ungeprüft übernommen.

Übersicht für Kehlnähte für 1,2mm Drahtdurchmesser					
Nahtgröße [mm]	4	5	6	7	8
Gasdurchfluss [l/min]	15	15	15	15	15
Anzahl der Lagen	1	1	1	3	3
Drahtvorschub [m/min]	9,2	9,5	9,5	9,5	9,5
Schweißgeschwindigkeit [mm/min]	578	391	282	651	465
Strom [A]	280	300	300	300	300
Spannung [V]	28	29,5	29,5	29,5	29,5
Drahtverbrauch pro Meter Naht [g]	142	216	300	390	545
Gasverbrauch pro Meter Naht [l]	26	38	53	69	87
Schweißzeit pro Meter Naht [min]	1,73	2,56	3,55	4,61	6,45

Tabelle 30: Einstelldaten der Fa. Oerlikon für Kehlnähte

Wie in der Tabelle zu erkennen ist, werden stark schwankende Schweißgeschwindigkeiten vorgegeben, die bei von Hand geschweißten Nähten schwierig einzuhalten sind. Auch bei den Empfehlungen für die V-Nähte werden Schweißgeschwindigkeiten bis 700mm/min angeführt, die selbst für geübte Schweißer kaum reproduzierbar sind.

Übersicht für V-Nähte											
Blechdicke b [mm]	4	5	6	8	10						
Öffnungswinkel [°]	0°	50°	50°	50°	50°						
Spaltbreite t [mm]	2	2	2	2	2,5						
Steg s [mm]	0	0	0	0	0						
Nahtfläche A [mm ²]	9,5	36,93	52,33	84,31	123,91						
Drahtdurchm. [mm]	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2						
Gasdurchfluss [l/min]	10	12	12	13	13						
Anzahl der Lagen	1	2	2	3	3						
Lagenart		Wurz	Deck	Wurz	Deck	Wurz	Zw.L	Deck	Wurz	Zw.L	Deck
Drahtvors. [m/min]	4,8	4,3	8	4,3	8,35	3,1	8,15	8,15	3,2	9	9
Geschw. [mm/min]	289	228	476	290	329	195	659	596	200	402	322
Strom [A]	135	125	200	125	205	135	270	270	135	290	290
Spannung [V]	19	18,5	21	18,5	21,5	18	27,5	27,5	18,5	28	28
Drahtverb. p. lfm. [g]	103	221	249	374	591						
Gasverbr. pro lfm. [l]	35	78	78	99	134						
Zeit pro lfm. [min]	3,5	6,49	6,49	8,34	10,59						

Tabelle 31: Einstelldaten der Fa. Oerlikon für V-Nähte

In der Testreihe wurden für die Kehlnähte und V-Nähte beim konventionellen MAG-Schweißen in der Wannenlage folgende Rahmenbedingungen festgelegt:

- Strom und Spannung gelten für 1,2mm Massivdraht bei ca. 15mm Stick-Out
- Basismaterial S355J2+N (Wst. Nr. 1.0577) ohne Vorwärmung
- Schweißkante wie in den Kapiteln dargestellt
- Schweißposition PA, Schweißung erfolgt einlagig
- Schweißkanten frei von Walzhaut, Zunder oder Korrosion
- Schweißnahtgeometrie für Kehlnähte werden aus Kapitel 4.1. für konventionelle MAG-Schweißgeräte übernommen
- Schweißnahtgeometrie für V-Nähte werden ebenfalls aus Kapitel 4.1. für konventionelle MAG-Schweißgeräte übernommen

Testreihe mit konv. Schweißgerät					
Nahtgröße a [mm]	4	5	6	7	8
Gasdurchfluss [l/min]	10	10	10	12	12
Anzahl der Schweißlagen	1	1	1	1	1
Drahtvorschub [m/min]	6,9	10,2	13,0	13,0	13,0
Abschmelzleistung [kg/h]	3,7	5,4	7,0	7,0	7,0
Richtwert Strom I [A]	236	296	350	350	350
Richtwert Spannung U [V]	21,5	27,6	30,5	30,5	30,5
Gasverbrauch pro Meter [l/m]	28,5	28,5	32,2	50	63
Streckenenergie [kJ/cm]	8,69	14,01	20,7	26,7	33,7
Geschwindigkeit [cm/min]	35	35	31	24	19
Schweißzeit pro Meter [min]	2,85	2,85	3,22	4,17	5,26
Lichtbogenart	ÜLB	SLB	SLB	SLB	SLB

Tabelle 32: Schweißdaten für Kehlnähte mit konv. MAG-Gerät

Beim konventionellen MAG-Schweißen, insbesondere mit dem verwendeten konventionellen MAG Schweißgerät, werden Nahtgrößen bis ca. $a = 5,5\text{mm}$ realisiert. Dies liegt in erster Linie an der maximal einstellbaren Stromstärke von 350A begrenzt ist. Die Nahtgrößen 6, 7 und 8mm werden in der Praxis kaum einlagig durchgeführt. In der Testreihe war die thermische Belastung auf den Schweißer ausgesprochen hoch, konnten aber mit passablen Ergebnis durchgeführt werden.

Für V-Nähte wurden folgende Daten ermittelt:

Testreihe mit konv. Schweißgerät					
Blechdicke = Nahtgröße b [mm]	4	5	6	8	10
Gasdurchfluss [l/min]	10	10	10	12	12
Anzahl der Schweißlagen	1	1	1	1	1
Drahtvorschub [m/min]	4,4	8,1	12,5	13,0	13,0
Abschmelzleistung [kg/h]	2,3	4,3	6,7	7,0	7,0
Richtwert Strom I [A]	167	256	337	350	350
Richtwert Spannung U [V]	18,4	24	29,5	30,5	30,5
Gasverbrauch pro Meter [l]	28,5	28,5	28,5	57,1	100
Streckenenergie kJ/cm	5,25	10,54	17	30,5	53,4
Geschwindigkeit [cm/min]	35	35	35	20	12
Schweißzeit pro Meter [min]	2,85	2,85	2,85	4,76	8,33
Lichtbogenart	ÜLB	SLB	SLB	SLB	SLB

Abbildung 33: Schweißdaten für V-Nähte mit konv. MAG-Schweißgerät

Die Blechdicken 8mm bzw. 10mm werden ähnlich wie bei den Kehlnähten standardmäßig nicht einlagig durchgeführt.

Daher prüfen wir im wirtschaftlichen Sinne, ob eine einlagige Schweißung die bessere Variante wäre, wenn man die richtigen Umgebungsparameter (Schrumpfung, Verzug, Wärmeeinfluss etc.) gewährleisten könnte. Daher sind insbesondere die größeren Schweißnahtgrößen bzw. Blechdicken bei den V-Nähten für die Wirtschaftlichkeitsberechnung interessant.

In der Testreihe wurden für die Kehlnähte und V-Nähte beim HL-MAG-Schweißen in der Wannenlage folgende Rahmenbedingungen festgelegt:

- Strom und Spannung gelten für 1,2mm Massivdraht bei ca. 30mm Stick-Out
- Basismaterial mit 200°C Vorwärmung, Spritzverluste von 2% sind einkalkuliert
- Schweißkante wie in den Kapiteln dargestellt, frei von Walzhaut, Zunder oder Korrosion
- Schweißposition PA, Schweißung erfolgt einlagig
- Schweißnahtgeometrie für Kehlnähte werden aus Kapitel 4.1. für konventionelle MAG-Schweißgeräte übernommen
- Schweißnahtgeometrie für V-Nähte werden aus Kapitel 4.2. für HL-MAG-Schweißgeräte übernommen

Testreihe mit HL-MAG-Schweißgerät					
Nahtgröße a [mm]	4	5	6	7	8
Gasdurchfluss [l/min]	---	---	20	22	22
Anzahl der Schweißlagen	---	---	1	1	1
Drahtvorschub [m/min]	---	---	21,9	28,6	29
Abschmelzleistung [kg/h]	---	---	11,7	15,3	15,5
Richtwert Strom I [A]	---	---	388	485	500
Richtwert Spannung U [V]	---	---	36,5	45,6	50
Gasverbrauch pro Meter [l]	---	---	40	44	68,9
Streckenenergie [kJ/cm]	---	---	21,81	26,54	37,5
Geschwindigkeit [cm/min]	---	---	50	50	32
Schweißzeit pro Meter [min]	---	---	2	2	3,13
Lichtbogenart	SLB	SLB	RLB	RLB	RLB

Tabelle 34: Schweißdaten für Kehlnähte mit HL-MAG-Gerät

Bei den Kehlnähten mit der Nahtgröße 4 und 5mm konnte bei der maximalen manuellen Schweißgeschwindigkeit von 60cm/min kein Rotationslichtbogen erzeugt werden, daher bleiben die Tabellendaten offen. In der Testreihe hat sich keine Möglichkeit ergeben, die Nahtgröße einzuhalten und gleichzeitig die Schweißgeschwindigkeit nicht

zu überschreiten. Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit beschränkt sich daher auf die größeren Nahtdicken.

Für V-Nähte wurden folgende Daten ermittelt:

Testreihe mit HL-MAG-Schweißgerät					
Blechdicke = Nahtgröße b [mm]	4	5	6	8	10
Gasdurchfluss [l/min]	---	---	20	22	22
Anzahl der Schweißlagen	---	---	1	1	1
Drahtvorschub [m/min]	---	---	17,9	28	28
Abschmelzleistung [kg/h]	---	---	9,6	14,9	14,9
Richtwert Strom I [A]	---	---	429	500	500
Richtwert Spannung U [V]	---	---	33,5	48	48
Gasverbrauch pro Meter [l]	---	---	32	56	92
Streckenenergie kJ/cm	---	---	14,1	36,55	60,5
Geschwindigkeit [cm/min]	---	---	61	39,4	23,8
Schweißzeit pro Meter [min]	---	---	1,6	2,54	4,2
Lichtbogenart	ÜLB	SLB	RLB	RLB	RLB

Tabelle 35: Schweißdaten für V-Nähten mit HL-MAG-Schweißgerät

Bei den V-Nähten mit der Blechdicke von 4 und 5mm konnte bei der maximalen manuellen Schweißgeschwindigkeit von 60cm/min kein Rotationslichtbogen erzeugt werden, daher bleiben die Tabellendaten offen. Bei der Blechdicke von 6mm konnte bei 61cm/min ein stabiler Rotationslichtbogen erzeugt werden.

In der Testreihe wurden für die Kehlnähte und V-Nähte beim UP-Schweißen in der Wannenlage folgende Rahmenbedingungen festgelegt:

- Strom und Spannung gelten für 4mm Massivdraht
- Basismaterial mit 200°C Vorwärmung,
- Schweißkante wie in den Kapiteln dargestellt, frei von Walzhaut, Zunder oder Korrosion
- Schweißposition PA, Schweißung erfolgt einlagig
- Schweißnahtgeometrie für Kehlnähte werden aus Kapitel 4.1. für konventionelle MAG-Schweißgeräte übernommen
- Schweißnahtgeometrie für V-Nähte werden aus Kapitel 4.3. für UP-Schweißgeräte übernommen

Testreihe UP-Schweißen					
Nahtgröße a [mm]	4	5	6	7	8
Anzahl der Lagen	1	1	1	1	1
Schweissgeschwindigkeit [mm/min]	700	600	550	480	465
Strom [A]	575	650	725	800	875
Spannung [V]	31	32	33	34	35
Pulververbrauch pro Meter [kg/m]	0,38	0,41	0,45	0,54	0,62
Drahtverbrauch pro Meter Naht [g/m]	142	216	300	390	545
Schweißzeit pro Meter Naht [min]	1,43	1,67	1,82	2,08	2,15
Streckenenergie [kJ/cm]	15,3	20,8	26,1	34	39,5

Tabelle 36: Schweißdaten für Kehlnähte mit UP-Gerät

Für V-Nähte wurden folgende Daten ermittelt:

Testreihe UP-Schweißen					
Blechdicke = Nahtgröße b [mm]	4	5	6	8	10
Anzahl der Lagen	---	---	1	1	1
Schweissgeschwindigkeit [mm/min]	---	---	610	550	480
Strom [A]	---	---	725	800	875
Spannung [V]	---	---	33	34	35
Pulververbrauch pro Meter [kg/m]	---	---	0,4	0,43	0,54
Drahtverbrauch pro Meter Naht [g/m]	---	---	176	282	392
Schweißzeit pro Meter Naht [min]	---	---	1,63	1,82	2,08
Streckenenergie [kJ/cm]	---	---	23,5	29,7	38,3

Tabelle 37: Schweißdaten für V-Nähte mit UP-Gerät

Bei den V-Nähten mit der Blechdicke von 4 und 5mm konnte trotz keramischer Badsicherung mit dem 4mm Zusatzwerkstoff keine zufriedenstellenden Schweißverbindungen hergestellt werden. Ein kleinerer Zusatzwerkstoff sollte jedoch im Vergleich nicht zur Anwendung kommen, daher bleiben diese Felder offen.

5. Wirtschaftlichkeit der evaluierten Schweißverfahren

Die Wirtschaftlichkeit für das Schweißen von Bauteilen hängt im Wesentlichen ab von:

- Einer schweißoptimalen Konstruktion
- Wahl des passenden Schweißzusatzwerkstoffs
- Der Wahl des geeignetsten Schweißverfahrens

Die schweißoptimale Konstruktion beinhaltet die richtige Wahl der Nahtform, da sie wesentlichen Einfluss auf das Schweißnahtvolumen hat. Ebenso beinhaltet es eine auf das Schweißnahtvolumen abgestimmte Fugengestaltung bzw. eine optimierte Anordnung und Lage der Schweißnähte. In dieser Evaluierung wird im Wesentlichen Bezug auf vergleichbar Schweißnahtgeometrien genommen, die jeweils auf den Schweißprozess optimiert wurden, aber immer noch im Rahmen der normativen Vorgaben liegen. Es werden keine, außerhalb der Norm liegenden Optimierungen bezüglich der Fugengestaltung vorgenommen. Zudem war es uns wichtig, die Kantenanarbeitung mit herkömmlichen, in nahezu jedem Schweißbetrieb zur Verfügung stehenden Arbeitsmitteln (z.B. Autogenschweißbrenner) herstellen zu können.

Für die Wahl des passenden Zusatzwerkstoffs wurden keine separaten Testreihen durchgeführt, sondern die Empfehlungen der Hersteller für die Verbindung des Grundwerkstoffs S355J2+N (Wst.Nr. 1.0577) verwendet. Dies sind sowohl für das konventionelle MAG-Schweißen, als auch für das HL-MAG-Schweißen der Zusatzwerkstoff G3Si1 nach EN 440 mit dem Durchmesser 1,2mm vom Zusatzwerkstoffhersteller Fa. Böhler (Bestellname: EMK 6). Der Zusatzwerkstoff führt in Kombination mit beiden Mischgasen zu hervorragenden Schweißergebnissen. Für das UP-Schweißen mit dünnwandigen Bauteilen aus unlegierten Baustahl empfiehlt sich die Kombination aus dem Pulver Böhler BF16 (Mangan-Silikat-Typ. Bezeichnung nach EN 760:1996: SF MS 1 78 AC) und der Schweißdraht Böhler EMS 2 (Bezeichnung nach EN 756: 2004: S2). Das Pulver sollte vor der Anwendung bzw. nach längerer Lagerung 1-10 Stunden bei 250-350° rückgetrocknet werden um einen geringen Wasserstoffgehalt von <5mg/100g Schüttgut zu erhalten.

5.1. Kostenproduzierende Faktoren

Die kostenproduzierenden Faktoren einer Schweißstätigkeit sind aufzugliedern in beeinflussbare und nicht beeinflussbare Faktoren. Zu den nicht beeinflussbaren Faktoren gehören z.B. fixe Kosten für die Anschaffung des Schweißgerätes, Strom- sowie Gas-kosten. Auch den Stundensatz für die Arbeiterstunden nehmen wir in dem Vergleich als unbeeinflussbar an, wenngleich unterschiedliche Arbeitserfahrungen und Qualifikationen eines Arbeiters in der Praxis zwangsweise zur Gehaltsfindung herangezogen werden. Wir nehmen daher einen gängigen Arbeiterstundensatz pro Arbeitsstunde als gegeben an.

Die beeinflussbaren Faktoren können nochmals aufgeteilt werden in voll beeinflussbare und bedingt beeinflussbare Faktoren. Zu den bedingt beeinflussbaren Faktoren gehören jene Faktoren, bei der der Mensch beispielsweise die Ausführungszeit eines Arbeitsablaufes nur bis zu einem bestimmte Grad beeinflussen kann, wenn das Arbeitsverfahren oder –methode einen Spielraum ermöglichen, z.B. das manuelle Schweißen oder teilmechanisiertes Schweißen). Zu den voll beeinflussbaren Faktoren gehören jene Faktoren, die ausschließlich vom Menschen abhängen, beispielsweise Vorbereitungen auf die eigentliche Arbeit wie Zeichnung lesen, Rüsten, Montage etc.

Auflistung von unbeeinflussbaren Faktoren:

Fixwerte	Preise
Kosten für 1,0mm Drahtdurchmesser [€/kg]	3,28
Kosten für 1,2mm Drahtdurchmesser [€/kg]	3,26
Kosten für 4mm Drahtdurchmesser [€/kg]	7,28
Kosten für Schweißgas EN 14175 ArC 18 [€/l]	0,007
Kosten für Schweißgas EN 14175 ArHeO 25/3	0,014
Kosten für Schweißpulver [€/kg]	1,25
Kosten für keramische Badsicherung [€/m]	2,89
Kosten für den Strom [€/kWh]	0,1
Lohn- und Gemeinkosten [€/h]	45
Einschaltdauer [%]	40

Tabelle 38: Kosten der unbeeinflussbaren Faktoren

5.1.1. Faktoren für Kehlnähte

Bei den variablen Kosten werden folgende Formeln für bestimmte Kehlnahtgrößen oder Blechdicken verwendet:

- Tatsächliche Schweißnahtlänge (Formel):

$$L = 60\text{min} / \text{Schweißzeit pro Meter Naht [min/m]} * \text{Einschaltdauer}$$

- Tatsächliche Abschmelzleistung pro Stunde (Formel):

$$M = \text{Drahtverbrauch pro Meter} * 60\text{min} / \text{Schweißzeit pro Meter Naht} * \text{Einschaltdauer}$$

$$\text{Alternativ dazu (Formel)}: M = \text{Abschmelzleistung [kg/h]} * \text{Einschaltdauer}$$

- Tatsächlicher Gasverbrauch pro Stunde (Formel):

$$L = \text{Gasdurchsatz [l/min]} * 60 * \text{Einschaltdauer}$$

- Tatsächlicher Pulververbrauch:

$$Kg = \text{Tatsächliche Schweißnahtlänge} * \text{Pulververbrauch [kg/m]}$$

Für die verglichenen Kehlnahtgrößen ergeben sich folgende Daten:

Kehlnaht a = 6mm				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
tats. Nahtlänge [m/h]	6,76	8,42	12	14,7
tats. Abschmelzl. [kg/h]	2,03	2,8	4,68	4,59
tats. Gasverbrauch [l/h]	358,3	240	480	---
tats. Pulververbr. [kg/h]	---	---	---	6,62
Vorbereitungszeit [min/m]	2	2	2	2
Nacharbeitszeit [min/m]	1,5	1,5	1	2

Tabelle 39: Vergleichswerte für Kehlnähte a=6mm

In der Vorbereitungszeit sind Aufwände für die Kantenvorbereitung, Rüsten und Schweißvorbereitung berücksichtigt. In der Nacharbeitszeit sind Aufwände für die Nahtsäuberung, ev. Schlacke- oder Spritzerentfernung berücksichtigt.

Kehlnaht a = 7mm				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
tats. Nahtlänge [m/h]	5,21	5,76	12	11,47
tats. Abschmelzl. [kg/h]	2,03	2,8	6,12	5,85
tats. Gasverbrauch [l/h]	359,49	288	528	---
tats. Pulververbr. [kg/h]	---	---	---	6,19
Vorbereitungszeit [min/m]	2	2	2	2
Nacharbeitzeit [min/m]	4,5	1,5	1	2

Tabelle 40: Vergleichswerte für Kehlnähte a=7mm

Kehlnaht a = 8mm				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
tats. Nahtlänge [m/h]	3,72	4,56	7,67	11,16
tats. Abschmelzl. [kg/h]	2,03	2,8	6,2	7,2
tats. Gasverbrauch [l/h]	323,64	287,28	528	---
tats. Pulververbr. [kg/h]	---	---	---	6,92
Vorbereitungszeit [min/m]	2	2	2	2
Nacharbeitzeit [min/m]	4,5	1,5	1	3

Tabelle 41: Vergleichswerte für Kehlnähte a=8mm

Bei der Kehlnaht mit a=7mm bzw. a=8mm wurde bei den Daten der Fa. Oerlikon die 3-lagige Kehlnaht berücksichtigt, die nach jedem Schweißdurchgang ein Säubern der Schweißnaht für den nächsten Schweißdurchgang erforderlich macht. Bei den anderen Schweißverfahren wurde einlagig geschweißt.

5.1.2. Faktoren für V-Nähte

Die für die Kehlnähte herangezogenen Berechnungsformeln sind auch für die Vergleichswerte der V-Nähte anzuwenden.

Die Vergleichswerte für die V-Nähte sehen wie folgt aus:

Blechdicke b = 6mm				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
tats. Nahtlänge [m/h]	3,7	8,42	15	14,7
tats. Abschmelzl. [kg/h]	0,92	2,8	3,84	3,76
tats. Gasverbrauch [l/h]	288,6	240	480	---
tats. Pulververbr. [kg/h]	---	---	---	5,88
Vorbereitungszeit [min/m]	2	2	2	2
Nacharbeitzeit [min/m]	3	1,5	1	2

Tabelle 42: Vergleichswerte für V-Nähte bei 6mm Blechdicke

Blechdicke b = 8mm				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
tats. Nahtlänge [m/h]	2,88	5,04	12	13,19
tats. Abschmelzl. [kg/h]	1,08	2,8	5,96	6,55
tats. Gasverbrauch [l/h]	285,12	288	528	---
tats. Pulververbr. [kg/h]	---	---	---	5,67
Vorbereitungszeit [min/m]	2	2	2	2
Nacharbeitzeit [min/m]	4,5	1,5	1	2

Tabelle 43: Vergleichswerte für V-Nähte bei 8mm Blechdicke

Blechdicke b = 10mm				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
tats. Nahtlänge [m/h]	2,27	2,88	5,71	11,54
tats. Abschmelzl. [kg/h]	2,03	2,8	5,96	12,05
tats. Gasverbrauch [l/h]	304,18	288	528	---
tats. Pulververbr. [kg/h]	---	---	---	6,23
Vorbereitungszeit [min/m]	2	2	2	2
Nacharbeitzeit [min/m]	4,5	1,5	1	3

Tabelle 44: Vergleichswerte für V-Nähte bei 10mm Blechdicke

Bei der Blechdicke von 6mm wird in den Einstellwerten der Fa. Oerlikon eine 2-lagige Schweißung, bei den Blechdicken 8mm bzw. 10mm eine 3-lagige Schweißung empfohlen, daher wurde die Nacharbeit entsprechend oft gerechnet.

5.2. Prozeßevaluierung

In Kapitel 5.1 sind die für die Evaluierung relevanten Daten gesammelt und für eine bessere Vergleichbarkeit vereinheitlicht worden. Nun betrachten wir die Prozeßkosten miteinander um daraus einen optimalen Einsatzbereich herauslesen zu können. Für unsere Evaluierung werden prozeßabhängig bzw. im Zusammenhang zur Kehlnahtgröße bzw. Blechdicke die Kosten für den Gasverbrauch dargestellt. Die dazu verwendeten Formeln sind:

- Tatsächlicher Strombedarf (Formel):

$$\text{kWh} = \text{Stromstärke} * \text{Spannung} * \text{Einschaltdauer}$$

- Stromkosten bezogen auf Meter Schweißnaht (Formel):

$$\text{kWh - Preis} = \text{tatsächlicher Strombedarf} * \text{Stromkosten pro kWh} / \text{Meter Schweißnaht}$$

- Gaskosten bezogen auf Meter Schweißnaht (Formel):

Gas - Preis = Gasbedarf pro Stunde * Gaspreis pro Liter / Meter Schweißnaht

- Zusatzwerkstoffkosten bezogen auf Meter Schweißnaht (Formel):

ZWS - Preis = Abschmelzleistung pro Stunde * ZWS-Preis pro Meter / Meter Schweißnaht

- Schweißerkosten bezogen auf Meter Schweißnaht (Formel):

Schweißer - Preis = Stundensatz Schweißer / Meter Schweißnaht

- Zuarbeitskosten bezogen auf Meter Schweißnaht (Formel):

Zuarbeits - Preis = (Vorbereitungszeit+Nacharbeitszeit in min) * Stundensatz Schweißer / 60min

- Gesamtkosten bezogen auf Meter Schweißnaht (Formel):

Gesamt - Preis = (Gaskosten + Stromkosten + ZWS-Kosten + Schweißerkosten + Zuarbeitskosten) jeweils pro Meter

Die direkten Vergleiche der Schweißprozesse für die Kehlnähte in Tabellenform:

Kehlnähte a = 6mm				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
Stromstärke [A]	300	350	388	725
Spannung [V]	29,5	30,5	36,5	33
Leistung [kWh]	8,85	10,68	14,16	23,93
Strombedarf [kWh/h]	3,54	4,27	5,66	9,57
Gaskosten [€/m]	0,37	0,20	0,40	---
Pulverkosten [€/m]	---	---	---	0,50
Stromkosten [€/m]	0,05	0,05	0,05	0,07
ZWS-Kosten [€/m]	0,98	1,08	1,27	1,75
Schweißkosten [€/m]	6,66	5,34	3,75	3,06
Zuarbeitskosten [€/m]	2,63	2,63	2,25	3,00
Gesamtkosten [€/m]	10,68	9,30	7,72	8,39

Tabelle 45: Kostenvergleich bei einer Kehlnaht a = 6mm

Die optimierte Einstellung des konv. MAG-Gerätes lassen nur geringe Kostensenkungen gegenüber der Standardeinstellung zu. Dies liegt in erster Linie an dem geringen Vorteil der größeren Schweißguteinbringung. Die beiden HL-Schweißprozesse sind bei einer Kehlnaht $a=6\text{mm}$ bereits deutlich wirtschaftlicher als der herkömmliche Schweißprozess mit Basiseinstellungen bzw. die optimierte MAG-Schweißvariante.

Kehlnähte $a = 7\text{mm}$				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
Stromstärke [A]	300	350	485	800
Spannung [V]	29,5	30,5	45,6	34
Leistung [kWh]	8,85	10,68	22,12	27,20
Strombedarf [kWh/h]	3,54	4,27	8,85	10,88
Gaskosten [€/m]	0,48	0,35	0,44	---
Pulverkosten [€/m]	---	---	---	0,60
Stromkosten [€/m]	0,07	0,07	0,07	0,09
ZWS-Kosten [€/m]	1,27	1,58	1,66	2,87
Schweißkosten [€/m]	8,64	7,81	3,75	3,92
Zuarbeitskosten [€/m]	4,88	2,63	2,25	3,00
Gesamtkosten [€/m]	15,33	12,45	8,18	10,49

Tabelle 46: Kostenvergleich bei einer Kehlnaht $a = 7\text{mm}$

Bei der Kehlnaht $a=7\text{mm}$ ergibt sich bei der einlagig geschweißten Variante mit dem konventionellen MAG-Schweißgerät trotz langsamerer Schweißgeschwindigkeit bereits ein deutlicher Vorteil gegenüber der 3-lagig geschweißten herkömmlichen Variante. Beide HL-Schweißverfahren haben aufgrund ihrer größeren Abschmelzleistung eine bereits deutlich höhere Wirtschaftlichkeit. Das HL-MAG-Schweißverfahren befindet sich hier im optimalen Schweißbereich.

Kehlnähte $a = 8\text{mm}$				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
Stromstärke [A]	300	350	500	875
Spannung [V]	29,5	30,5	50	35
Leistung [kWh]	8,85	10,68	25,00	30,63
Strombedarf [kWh/h]	3,54	4,27	10,00	12,25
Gaskosten [€/m]	0,61	0,44	0,69	---
Pulverkosten [€/m]	---	---	---	0,69
Stromkosten [€/m]	0,10	0,09	0,13	0,11
ZWS-Kosten [€/m]	2,64	2,00	2,64	3,63
Schweißkosten [€/m]	12,10	9,87	5,87	4,03
Zuarbeitskosten [€/m]	4,88	2,63	2,25	3,75
Gesamtkosten [€/m]	20,31	15,03	11,57	12,21

Tabelle 47: Kostenvergleich bei einer Kehlnaht $a = 8\text{mm}$

Die Kosten gegenüber dem konventionellen MAG-Schweißverfahren, sowohl in der herkömmlichen, als auch in der parameteroptimierten Variante liegt bei beiden HL-Schweißverfahren deutlich tiefer. Der Kostenvorteil des HL-MAG-Schweißverfahrens gegenüber dem UP-Schweißverfahren verringert sich zunehmend. Das UP-Schweißverfahren kann durch seinen größeren Leistungsbereich die Anforderungen zunehmend besser erfüllen.

Für die V-Nähte sieht der tabellarische Vergleich wie folgt aus.

Blechdicke b = 6mm				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
Stromstärke [A]	125/205	337	429	725
Spannung [V]	18,5/21,5	29,5	33,5	33
Leistung [kWh]	6,72	9,94	14,37	23,93
Strombedarf [kWh/h]	2,69	3,98	5,75	9,57
Gaskosten [€/m]	0,55	0,20	0,32	---
Pulverkosten [€/m]	---	---	---	0,45
Stromkosten [€/m]	0,07	0,05	0,04	0,07
ZWS-Kosten [€/m]	0,82	1,08	0,83	1,44
Badsicherung [€/m]	0,00	2,89	2,89	2,89
Schweißkosten [€/m]	12,16	5,34	3,00	3,06
Zuarbeitskosten [€/m]	3,75	4,13	3,00	4,50
Gesamtkosten [€/m]	17,35	13,69	10,08	12,40

Tabelle 48: Kostenvergleich bei einer V-Naht, Blechdicke 6mm

Die HL-Schweißverfahren ergeben, wie bei den vorherigen Schweißversuchen deutliche Kostenreduktionen gegenüber den herkömmlichen Standardparameter des MAG-Schweißgerätes. Besonders bemerkenswert ist jedoch, dass das konventionelle MAG-Schweißverfahren durch verbesserte Einstellwerte und trotz der zusätzlichen Maßnahmen einer Schweißbadsicherung erhebliche Kostensenkung gegenüber den herkömmlichen Einstellwerten für das MAG-Schweißverfahren bringt. Die höheren Kosten für die Vorbereitung durch das Anbringen der keramischen Schweißbadsicherung bzw. die Anschaffungskosten der Schweißbadsicherung selbst wird durch die deutlich geringen Kosten für das Schweißen selbst mehr als ausgeglichen. Bei größerer Blechdicke wird dieser Unterschied nochmals sichtbarer.

Blechdicke b = 8mm				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
Stromstärke [A]	135/270	350	500	800
Spannung [V]	18/29,5	30,5	48	34
Leistung [kWh]	9,86	10,68	24,00	27,20
Strombedarf [kWh/h]	3,94	4,27	9,60	10,88
Gaskosten [€/m]	0,69	0,40	0,44	---
Pulverkosten [€/m]	---	---	---	0,48
Stromkosten [€/m]	0,14	0,08	0,08	0,08
ZWS-Kosten [€/m]	1,22	1,81	1,62	2,79
Badsicherung [€/m]	0,00	2,89	2,89	2,89
Schweißkosten [€/m]	15,63	8,93	3,75	3,41
Zuarbeitskosten [€/m]	4,88	4,13	3,75	4,50
Gesamtkosten [€/m]	22,55	18,24	12,53	14,16

Tabelle 49: Kostenvergleich bei einer V-Naht, Blechdicke 8mm

Wie bereits aus den vorherigen Test erkennbar können sich die HL-Schweißverfahren im wirtschaftlichen Sinne von dem herkömmlichen und dem optimierten MAG-Schweißverfahren deutlich absetzen, wobei der Unterschied zwischen dem HL-MAG-Verfahren und dem UP-Verfahren etwas geringer geworden ist. Auch in dieser Testreihe zeigt sich eine deutliche Verbesserung zwischen der 3-lagig geschweißten herkömmlichen Variante und die schweißbadgestützte optimierte einlagige Variante.

Blechdicke b = 10mm				
Werte	Oerlikon	konv. MAG	HL-MAG	UP
Stromstärke [A]	135/290	350	500	875
Spannung [V]	18,5/28	30,5	48	35
Leistung [kWh]	10,62	10,68	24,00	30,63
Strombedarf [kWh/h]	4,25	4,27	9,60	12,25
Gaskosten [€/m]	0,94	0,70	0,92	---
Pulverkosten [€/m]	---	---	---	0,60
Stromkosten [€/m]	0,19	0,15	0,17	0,11
ZWS-Kosten [€/m]	2,92	3,17	3,40	5,87
Badsicherung [€/m]	0,00	2,89	2,89	2,89
Schweißkosten [€/m]	19,82	15,63	7,88	3,90
Zuarbeitskosten [€/m]	4,88	4,13	3,75	5,25
Gesamtkosten [€/m]	28,74	26,66	19,02	18,62

Tabelle 50: Kostenvergleich bei einer V-Naht, Blechdicke 10mm

Das UP-Schweißverfahren schneidet bei 10mm Blechstärke dank seiner hohen Abschmelzleistung bereits am besten ab. Den hohen Kosten für den Zusatzwerkstoff und Schweißpulver stehen eine hervorragende Schweißnahtleistung gegenüber, die sich bei zunehmender Blechdicke bemerkbar macht. Die Gesamtkosten zwischen dem

MAG-Schweißen mit herkömmlichen Schweißparameter und dem UP-Schweißen verringern sich bereits signifikant.

Der direkte Vergleich der ausgewerteten Kosten pro Meter Kehlnaht lässt sich in Diagrammform so darstellen:

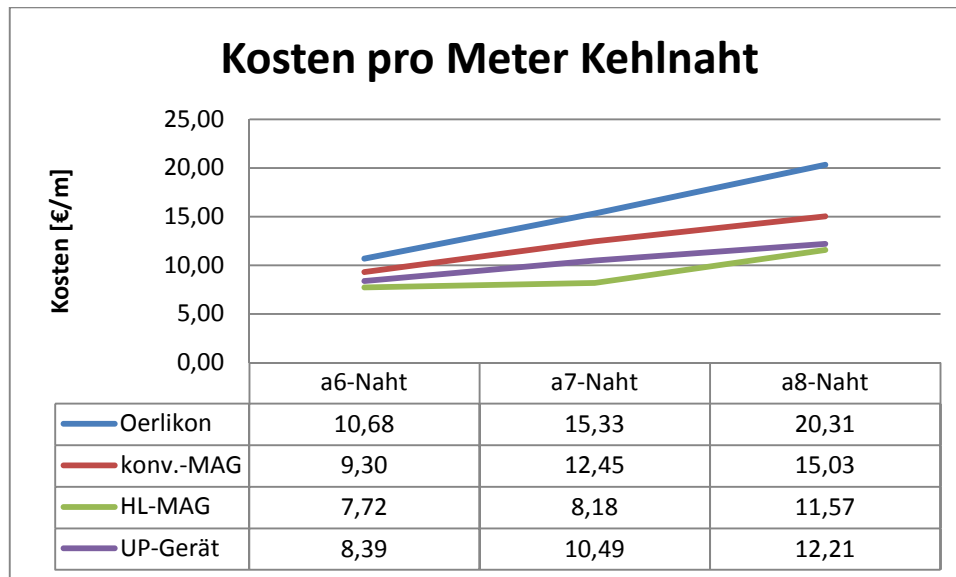


Abbildung 64: Gesamtkostenvergleich pro Meter Schweißnaht bei Kehlnähte

Deutlich zu erkennen ist, dass die spezifischen Kosten pro Meter bei größer werdender Nahtdicke beim HL-MAG-Schweißen rasch steigen. Es lässt sich daher sagen, dass eine einlagig geschweißte Kehlnaht bis ca. a = 8mm noch kostenoptimal schweißbar ist. Darüber hinaus empfiehlt es sich, auf ein UP-Gerät umzusteigen, wenn die Rahmenbedingungen der Schweißnaht (Zugänglichkeit, Schweißnahtlänge etc.) dies ermöglichen.

	Oerlikon	konv.-MAG	HL-MAG	UP-Gerät
a6-Naht	100,00%	87,08%	72,28%	78,56%
a7-Naht	100,00%	81,21%	53,36%	68,43%
a8-Naht	100,00%	74,00%	56,97%	60,12%

Tabelle 51: Kostenersparnis bei Kehlnähte in %

Die Tabelle 51 veranschaulicht das Einsparungspotenzial zwischen den herkömmlichen MAG-Schweißprozessen und den HL-Schweißprozessen deutlich. Während beim konventionellen MAG-Schweißverfahren Einsparungspotenziale bis ca. 26% durch optimierte Prozeßeinstellungen möglich ist, kann beim UP-Verfahren bei zunehmendem Schweißgutbedarf bis ca. 40%, beim HL-MAG-Schweißen sogar bis ca. 47% Kostenreduktion gegenüber den herkömmlichen MAG-Schweißparametern erreicht werden.

Der direkte Vergleich der ausgewerteten Kosten pro Meter V-Schweißnaht in Diagrammform:

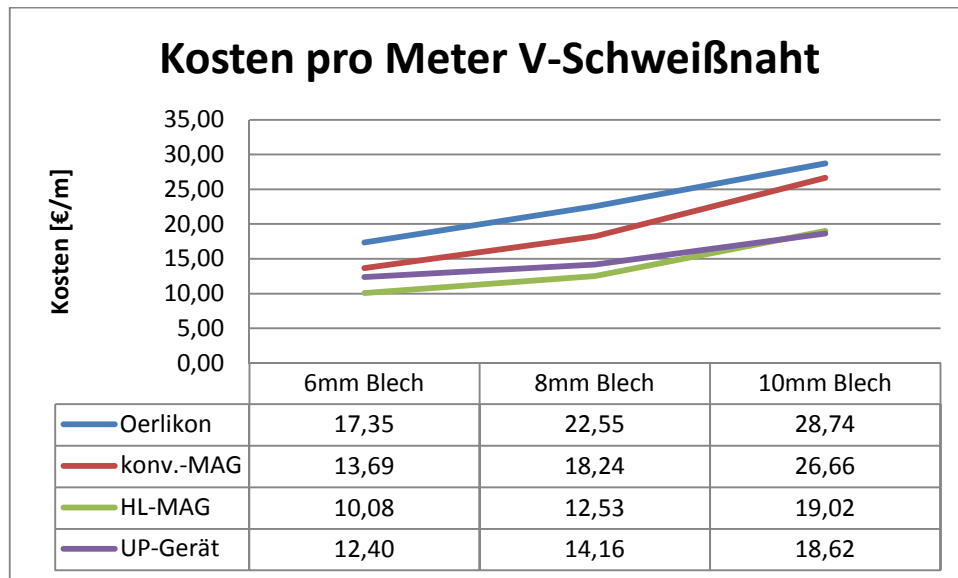


Abbildung 65: Gesamtkostenvergleich pro Meter Schweißnaht bei V-Nähte

Wie bereits oben erwähnt bilden bei den V-Nähten Blechdicken bis ca. 8mm bei einlagiger Schweißung den optimalen Einsatzbereich des HL-MAG-Schweißens. Auch das UP-Schweißverfahren bietet hohe Kostenvorteile insbesondere bei den in der Testreihe geprüften Blechstärken 8mm und 10mm.

	Oerlikon	konv.-MAG	HL-MAG	UP-Gerät
6mm Blech	100,00%	78,90%	58,10%	71,47%
8mm Blech	100,00%	80,89%	55,57%	62,79%
10mm Blech	100,00%	92,76%	66,18%	64,79%

Tabelle 52: Kostenersparnis bei V-Nähte in %

In der Tabelle 52 wird wie in Tabelle 51 das Einsparungspotenzial der HL-Schweißverfahren veranschaulicht. Die optimierten MAG-Schweißparameter können bei dünneren Blechdicken von z.B. 6mm noch bis zu 21% Kostenersparnis bringen, verlieren jedoch aufgrund der höheren Vorbereitungszeit und zusätzlichen Kosten für die Schweißbadsicherung zunehmend an Wirtschaftlichkeit. Die HL-Schweißprozesse können jedoch deutliche Kostenvorteile von bis zu 42% (HL-MAG-Schweißverfahren) bei 6mm Blechdicke, 45% (HL-MAG-Schweißverfahren) bei 8mm Blechdicke bzw. 35% (UP-Schweißverfahren) bei 10mm Blechdicke bedeuten.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Wirtschaftlichkeit für das manuelle Schweißen von Bauteilen im Stahl- und Metallbau gewinnt durch den hohen Konkurrenz- und Preisdruck zunehmend an Bedeutung. Dies gilt umso mehr für Bauteile, die einen hohen schweißtechnischen Arbeitsanteil (und somit Kostenanteil) haben und wegen ihrer baulichen oder statischen Anforderungen als Einzelstücke gefertigt werden, wie z.B. Stahlbrücken. Stahlbrücken gibt es viele, aber kaum eine gleicht einer anderen. Umso wichtiger ist es, bei dem Kostenfaktor „Fertigungskosten“ Optimierungspotenziale ausfindig zu machen, die bei den Herstellungskosten maßgeblich zum wirtschaftlichen Erfolg eines Bauteils oder eines ganzen Projektes beitragen können. Daher ist es besonders wichtig, kostenproduzierende Faktoren, insbesondere die beeinflussbaren in einem Betrieb zu kennen, Alternativen zu finden und gegenüber zu stellen. In dieser Arbeit geht es in erster Linie darum, die Kosten pro Meter Schweißnaht mittels unterschiedlicher Schweißverfahren zu erfassen und gegenüberzustellen.

Das konventionelle MAG-Schweißverfahren ist in den meisten Schweißbetrieben immer noch das meistverwendete Schweißverfahren zum thermischen Fügen von Bauteilen. Seine Anwendbarkeit im Dünnblechbereich sowie in den meisten Zwangslagen machen das Verfahren vielseitig und universell. Allerdings sind dem Verfahren nicht zuletzt durch die geringe Abschmelzleistung Grenzen im Sinne der Wirtschaftlichkeit gesetzt. In der durchgeführten Testreihe konnten zwar durch Parameterveränderungen geringfügige Verbesserungen erzielt werden, die jedoch, insbesondere beim einlagigen Schweißen von Blechen durch zusätzliche Maßnahmen wie Vorkehrungen zur Schweißbadsicherung und die damit verbundene, erhöhte Vorbereitungszeit teilweise wieder Zunichte gemacht wurden. Daher war es naheliegend, einen Vergleich mit anderen Schweißverfahren zu machen.

Die Testreihen zeigen, dass gerade mit dem HL-MAG-Schweißverfahren, aber auch mit dem UP-Schweißverfahren optimale Ergebnisse und somit deutliche Kostenreduktionen erzielbar sind, wenn die dafür notwendigen Rahmenbedingungen (richtige Schweißposition, Zugänglichkeit etc.) vorliegen. Beide Verfahren bieten in der geprüften Wannenlage, die das Ziel jeder Schweißung sein sollte, ausgezeichnete Ergebnisse. Die Kosten pro Meter Schweißnaht ließen sich in der durchgeführten Testreihe je nach Nahtvariante und Schweißnahtgröße um bis zu 47% senken. Es lässt sich daher bereits aus der geringen Anzahl an vorliegenden Testergebnissen ableiten, dass es auch bei geringen Naht- bzw. Blechstärken wirtschaftlichere Schweißverfahren, als das konventionelle MAG-Schweißverfahren, gibt.

Es liegt daher nahe, möglichst alle Schweißnähte nicht nur nach ihren statischen oder konstruktiven Bedürfnissen auszurichten, sondern ganz besonders darauf zu achten, Schweißnähte so anzulegen, dass sie auf die Möglichkeit bieten, Hochleistungsschweißverfahren einzusetzen. Dies lässt sich nur umsetzen, wenn die gesamte Arbeitsablaufkette, vom Konstrukteur bis zu Schweißer selbst, die Anforderungen der Schweißverfahren kennt. Insgesamt kann jedoch gesagt werden, dass die Schweißbetriebe wirtschaftlich konkurrenzfähig bleiben, die sich darum bemühen, sich Alternativen zu dem konventionellen MAG-Schweißverfahren überlegen. Schweißtechnische Herausforderungen sollten weniger als kostenproduzierendes Übel angesehen werden, sondern vielmehr als Anwendungsbereich technischer Kompetenz mit dem Ziel der wirtschaftlichen Überlegenheit.

Literaturverzeichnis

Matthes Siegfried: Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, 5. Auflage 1996, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, ISBN 978-3-540-61046-5

Cramer K.: Qualitätssicherung in der Schweißtechnik – Schmelzschweißen und Bolzenschweißen von Metallen, Expert Verlag Ehningen bei Böblingen, 1993, ISBN 3-8169-0726-1

Ruge J.: Handbuch der Schweißtechnik: Band 1: Werkstoffe, 2. Auflage 1980, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 978-3-662-31689-4

Bartenschlager J., Dillinger J., Escherich W., Günter W., Ignatowitz E., Oesterle S., Reißler L., Stephan A., Vetter R., Wieneke F.: Fachkunde Metall – Mechanische Technologie, 57. Auflage 2014, Verlag Europa-Lehrmittel, ISBN 978-3-8085-1157-2

G. Schulze: Die Metallurgie des Schweißens, 4. Auflage 2010, Springer-Verlag Heidelberg-Dordrecht-London-New York, ISBN 978-3-642-03182-3

Dilthey U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen, 3. Auflage 2005, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-21674-X

Meier T. (Hrsg.), Ott M., Sauer R.: Materiale Textkulturen: Konzepte – Materialien – Praktiken, Walter de Gruyter GmbH, 2015, ISBN 978-3-11-037129-1

Stahlinstitut VDEh (Hrsg.): Stahlfibel, Stahleisen-Verlag, Düsseldorf, 2007, ISBN 978-3-514-00741-3

Brütsch-Rüegger AG (Hrsg.): Technische Schriftenreihe 09 – Einteilung und Bezeichnung der Stähle, 2001, CH-Regensdorf

Hasse S., Brunhuber E.: Giesserei Lexikon, 18. Auflage 2001, Verlag Schiele & Schön, ISBN 3-7949-0655-1

Gobrecht J.: Werkstofftechnik - Metalle, 2. Auflage 2006, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, ISBN 978-3-486-57903-1

Moeller E.: Handbuch Konstruktionswerkstoffe – Auswahl, Eigenschaften, Anwendung, 2. Auflage 2014, Carl Hanser Verlag München-Wien, ISBN 978-3-446-43169-0

Weißbach W., Dahms M., Jaroschek Ch.: Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, 19. Auflage 2015, Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-03918-9

Böge A.: Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendung der Maschinenbautechnik, 18. Auflage 2007, Friedrich & Sohn Vieweg Verlag - GWV Fachverlage, ISBN 978-3-8348-0110-4

Wenglorz H.-W.: Europäische Aluminiumwerkstoffe: Vergleich von EN mit DIN, 2. Auflage 2013, DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH Berlin-Wien-Zürich, ISBN 978-3-410-21368-0

Bargel H.-J., Schulze G.: Werkstoffkunde, 7. Auflage 2000, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, ISBN 978-3-540-66855-8

Stüssi F.: Entwurf und Berechnung von Stahlbauten, Erster Band: Grundlagen des Stahlbaus, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 1958, ISBN 978-3-662-11683-8

Gomeringer R., Heinzler M., Kilgus R., Menges V., Näher F., Oesterle S., Scholer C., Stephan A., Wieneke F.: Tabellenbuch Metall, 46. Auflage 2015, Verlag Europa-Lehrmittel

Schmidtman E., Thinnies D.: Einfluß der thermischen Behandlung beim Ein- und Mehrlagenschweißen auf die Gefügebildung und Bruchzähigkeit von simulierten und geschweißten Proben, Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, 1977, Westdeutscher Verlag

Kamps T.: Schweißen Aktuell 4.0: Schweißtechniken, Verfahren, Ausbildung und Beruf, Verlag: BookRix, 2015, ISBN 3-736-88293-9

Hochreiter G.: Unterpulverschweißen in der Praxis, expert-Verlag Renningen-Malmsheim, 1995, ISBN 3-8169-1062-9

Walther H.: Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik, Lehrgangsunterlagen IWE/EWE Ausgabe Juni 2006, WIFI Linz (Hrsg. und Verleger)

Kreindl J.: Hochleistungsprozesse, Lehrgangsunterlagen IWE/EWE, Ausgabe August 2008, WIFI Linz (Hrsg. und Verleger)

Ornig H.: Unterpulverschweißen, Lehrgangsunterlagen IWE/EWE, 9. Auflage 2004, WIFI Linz /Hrsg. und Verleger)

Schnick M., Füssel U., Häßler M., Dreher M.: Visualisierung der Schutzgasabdeckung beim Lichtbogenschweißen, 2012, Herausgeber: TU Dresden

Dreher M., Füssel U., Schnick M.: Strömungstechnische Auslegung von Lichtbogen-schweißbrennern, 2012, Herausgeber: TU Dresden

Dzelnitzki D.: Das High-Speed-Schweißen, ein zukunftsorientiertes MAG-Hochleistungsverfahren, 2000, Herausgeber: EWM Hightec Welding GmbH

Normen:

ISO 2553: Schweißen und verwandte Prozesse – Symbolische Darstellung in Zeichnungen – Schweißverbindungen, 2017

ISO 4063: Schweißen und verwandte Prozesse – Liste der Prozesse und Ordnungsnummern, 2010 (korrigierte Fassung)

ISO 4957: Werkzeugstähle, 1999

ISO 6947: Schweißen und verwandte Prozesse – Schweißpositionen, 2011

ISO 9692-1: Schweißen und verwandte Prozesse – Arten der Schweißnahtvorbereitung – Teil 1: Lichtbogenhandschweißen, Schutzgasschweißen, Gasschweißen, WIG-Schweißen und Strahlschweißen von Stählen, 2013

ISO 9692-2: Schweißen und verwandte Prozesse – Schweißnahtvorbereitung – Teil 2: Unterpulverschweißen von Stahl, 1998

ISO 14171: Schweißzusätze – Massivdrahtelektroden, Fülldrahtelektroden und Draht-Pulver-Kombinationen zum Unterpulverschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung, 2016

ISO 14174: Schweißzusätze – Pulver zum Unterpulverschweißen und Elektroschlackeschweißen – Einteilung, 2012

ISO 14175: Schweißzusätze – Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse, 2008

ISO 14341: Schweißzusätze – Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung, 2010

EN 10020: Begriffsbestimmung für die Einteilung der Stähle, 2000

EN 10025-1: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen

EN 10025-2: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle

EN 10027-1: Bezeichnungssysteme für Stähle – Teil 1: Kurznamen, 2016

EN 10027-2: Bezeichnungssystem für Stähle – Teil 2: Nummernsystem, 2015

EN 10083-1: Vergütungsstähle – Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen, 2006

EN 10083-2: Vergütungsstähle – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Stähle

EN 14610: Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe für Metallschweißprozesse, 2005

DIN 17007: Werkstoffnummern – Rahmenplan, 1959 (wurde 3/97 ersatzlos zurückgezogen)

Programme:

Dressel Peter: Programm „Grundlagen der Wärmebehandlung“, 2001, D-Siegen

Internet:

www.unitertra.de/rutherford/tab_hauf.htm, Inhaber: Kindler & Gliech GbR, D-Berlin, Stand 27.11.2016

<http://derstandard.at/1376533962878/Aelteste-Eisen-Artefakte-sind-extraterrestrischen-Ursprungs>, STANDARD Verlagsgesellschaft m.b.H., Wien, Veröffentlichung vom 20. August 2013, Stand 27.11.2016

www.formteile.ch/eisen.php#Geschichte, Inhaber: Otto Kälin, CH-Bellach, Stand: 10.10.2017

<https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Mineralienportrait/Eisen?lang=de&language=german>, Inhaber: Stefan Schorn, D-Kirchseeon, Stand 27.11.2016

<http://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahltechnologie/stahlerzeugung/>, Inhaber: Wirtschaftsvereinigung Stahl/Stahlinstitut VDEh, D-Düsseldorf, Stand: 10.10.2017

<http://kerschgens.stahl-lexikon.de/index.php/stahllexikon/39-e/1437-Einteilung%20der%20St%C3%A4hle.html>, BDS AG – Bundesverband Deutscher Stahlhandel, Stand: 12.10.2017

<http://www.wkv.at/service/lehr/fragenkataloge/WM/Leitfaden%20WM%203-1.pdf>, Inhaber: Wirtschaftskammer Österreich, A-Wien, Stand: 12.10.2017

<http://www.metalltechnik-lexikon.de/handelsformen-bei-staehlen/>, Inhaber: Martin Jagla, D-Iserlohn, Stand: 12.10.2017

<https://www.overhoff.de/Daten/Legierungselemente.pdf>, Inhaber: Overhoff Verbindungstechnik GmbH, D-Hemer, erstellt: 2005, Stand: 12.10.2017

http://seeberger.net/assets/pdf/16_Beeinflussung_durch_Waermebehandlungen.pdf, Inhaber: Seeberger GmbH & Co KG, Autor: Gressl Janina, erstellt: 2013, Stand: 12.10.2017

www.linn-high-therm.de/fileadmin/user_upload/pages/about_us/download/catalogues/Kleine_Fibel_fuer_den_Haerter.pdf, Inhaber: Linn High Therm GmbH, D-Eschenfelden, 09/1997, Stand 12.10.2017

https://www.linde-gas.at/internet.lg.lg.aut/de/images/1056_tfp_schweiss_formiergase550_169690.pdf?v=1.0, Inhaber: Linde Gase GmbH, Stand: 12.10.2017

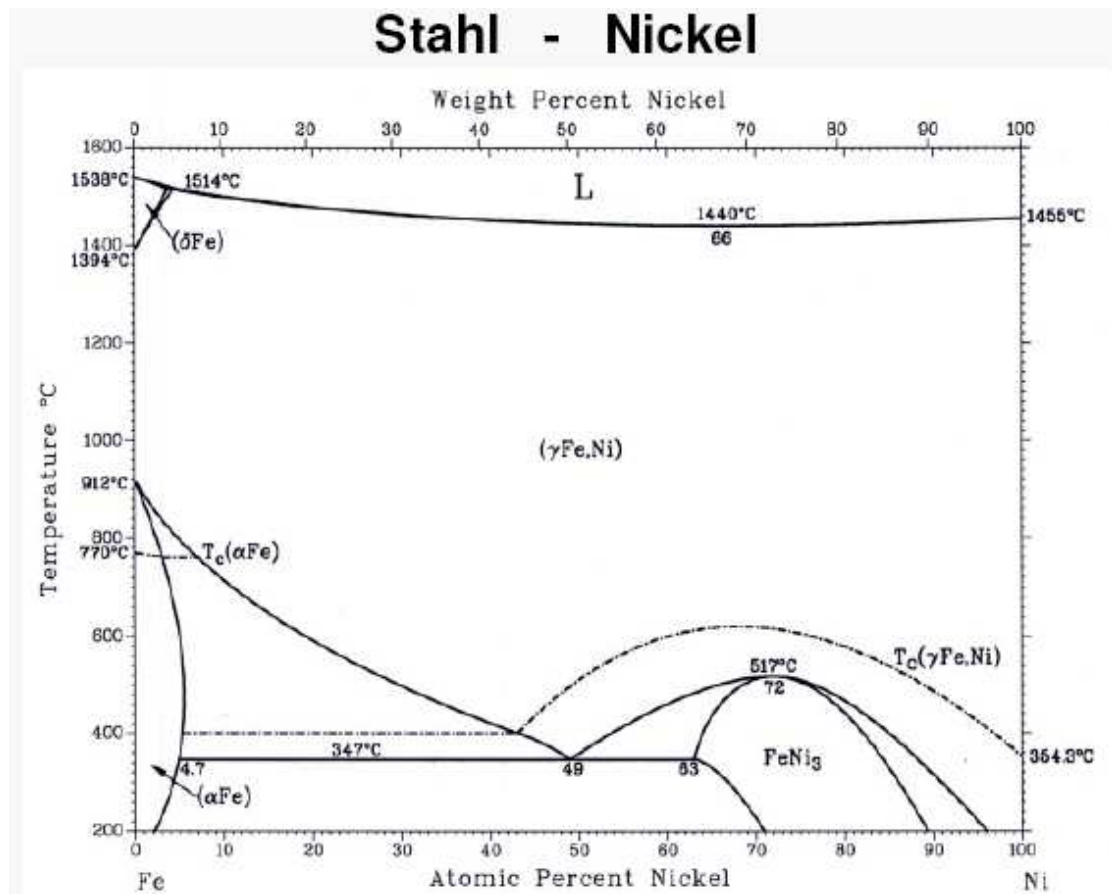
<http://www.kjellberg.de/Schweisstechnik/Service/Schweisverfahren/UP-Schweissen.html>, Inhaber: Teknoholt GmbH, Stand 12.10.2017

<https://www.bauforum.at/metall/mehr-kontrolle-beim-impulslichtbogenschweissen-64470>, Inhaber: Österreichischer Wirtschaftsverlag GmbH, Stand 15.10.2017

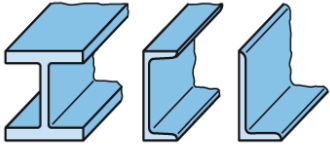
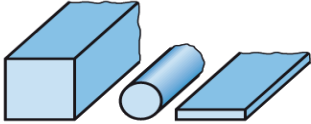
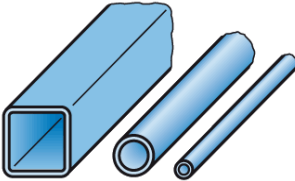
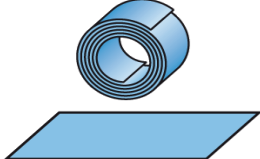

http://www.schweisstechnik.at/detail/automatische-brennerreinigung-fuer-beste-schweisergebnisse_94350, Inhaber: TBi Industries GmbH, D-Fernwald-Steinbach, Stand: 12.10.2017

Anlagen

Anlage 1: Eisen – Nickel – Phasendiagramm



Anlage 2: Stahlformen im Handel

Form	Beispiel	Kurzbezeichnung
 Formstähle	Breiter I-Träger (Doppel-T-Träger), 220mm hoch, aus Stahl S275JR, warmgewalzt	I-Profil DIN 1025 - IPB220 - S275JR
	Ungleichschenkeliger Winkelstahl, Schenkelbreiten 100mm und 50mm, Schenkeldicke 8mm, aus Stahl S235J0	L-Profil EN 10056 - L100x50x8 - S235J0
 Stabstähle	Warmgewalzter Vierkantstahl mit 10mm Seitenlänge aus Werkzeugstahl	Vierkant EN 10059 - 10 - C80U
	Blanker Rundstahl, Ø32mm, ISO-Toleranzklasse h8 aus Automatenstahl 35S20, kaltverformt	Rund EN 10278 - 32h8 - EN 10277-3 - 35S20+C
	Blanker Flachstahl, 16mm breit, 8mm dick, aus nichtrostendem Stahl	Flach EN 10278 - 16x8 - EN 10088-3 - X5CrNi18-10
 Rohre, Hohlprofile	Rechteckiges Vierkanthrohr, Außenmaße 115mmx140mm, Wanddicke 8mm, aus Stahl S275JR	Hohlprofil DIN EN 10210 - 140x115x8 - S275JR
	Nahtloses Präzisionsstahlrohr, 60mm Außen-Ø, 4mm Wanddicke, aus Stahl S355J2+N	Rohr EN 10305 - 60x4 - S355J2+N
	Quadratisches Hohlprofil, 60mm breit, Wanddicke 5mm, verzinkt, aus Stahl S355J0	Hohlprofil DIN EN 10210 - 60x60x5 - S355J0, verzinkt
 Bleche (Tafeln)	Warmgewalztes Stahlblech, 4,5mm dick, aus S235J0, 2000mm breit, 4500mm lang	Blech EN 10029 - 4,5x2000x4500 - S235J0
	Kaltgewalztes Blech aus weichen Stählen, 2mm dick, beste Oberfläche, matte Ausführung	Blech EN 10130 - 2 - DC04 - B-m
 Drähte	Verzinkter Stahldraht aus unlegiertem Stahl C4D, Ø 5mm	Draht EN 10016 - 5, verzinkt
	Runder, warmgewalzter Federdraht, Ø 8mm, aus Vergütungsstahl 50CrV	Draht DIN 2077 - 50CrV - 8

Anlage 3: Legierungselemente für Stahl

Elemente	Das Element erhöht	Das Element vermindert
Aluminium (Al)	Zunderwiderstand, Eindringen von Stickstoff	---
Beryllium (Be)	Ausscheidungshärtung	Zähigkeit (im geringen Maß)
Blei (Pb)	Zerspanbarkeit	---
Bismut (Bi)	Graphitzügler bei Temperguss, Zerspanbarkeit	---
Bor (B)	Festigkeit, Streckgrenze	Korrosionsbeständigkeit
Cer (Ce)	Zunderbeständigkeit, fördert Bildung von Kugelgraphit bei Gusseisen	wirkt pyrophor (bestimmte Legierungen)
Chrom (Cr)	Zugfestigkeit, Härte, Warmfestigkeit, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit	Dehnung (im geringen Maß), Schweißseignung, elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit
Cobalt (Co)	Härte, Schneidhaltigkeit, Warmfestigkeit	Kornwachstum bei höheren Temperaturen
Kalzium (Ca)	Zunderbeständigkeit, Desoxydationsmittel	---
Kupfer (Cu)	Witterungsbeständigkeit, Festigkeit, Lötbrüchigkeit	Bruchdehnung
Magnesium (Mg)	kugelige Graphitbildung in Gusseisen	---
Mangan (Mn)	Zugfestigkeit, Durchhärtbarkeit, Zähigkeit (bei wenig Mn)	Zerspanbarkeit, Kaltformbarkeit, Grafitausscheidung bei Grauguss
Molybdän (Mo)	Zugfestigkeit, Warmfestigkeit, Schneidhaltigkeit, Durchhärtung	Anlasssprödigkeit, Schmiedbarkeit (bei höherem Mo-Anteil)
Nickel (Ni)	Festigkeit, Zähigkeit, Durchhärtbarkeit, Korrosionsbeständigkeit	Wärmedehnung
Niob (Nb)	Feinkornhärtung, Festigkeit, Zähigkeit	---
Tantal (Ta)	Ferritbildner	meist in starker Verbindung mit Niob, hoher Absorptionsquerschnitt von Neutronen
Tellur (Te)	Zerspanbarkeit, hohe Oberflächenaktivität (reaktionsstark)	---
Titan (Ti)	vermindert interkristalline Korrosion, Seigerungsneigung, Zeitstandfestigkeit	---
Vanadium (V)	Dauerfestigkeit, Härte, Warmfestigkeit	Empfindlichkeit gegen Überhitzung
Wolfram (W)	Zugfestigkeit, Härte, Warmfestigkeit, Scheidhaltigkeit	Dehnung (in geringem Maße), Zerspanbarkeit
Zirkon (Zr)	desoxidierend, denitrierend, entschwefelnd	---

Anlage 4: Begleitelemente des Stahls

Elemente	Das Element erhöht	Das Element vermindert
Antimon (Sb)	---	starke Verringerung der Zähigkeit
Arsen (As)	Seigerungsneigung, Anlasssprödigkeit	Zähigkeit, Schweißbarkeit
Kohlenstoff (C)	Festigkeit und Härte (max. bei 0,9% C), Härbarkeit, Rissbildung (Flocken)	Schmelzpunkt, Dehnung, Schweiß- und Schmiedbarkeit
Phosphor (P)	Zugfestigkeit, Warmfestigkeit, Korrosionswiderstand	Kerbschlagzähigkeit, Schweißbarkeit
Sauerstoff (O)	Alterungssprödigkeit	Kerbschlagzähigkeit
Schwefel (S)	Zerspanbarkeit	Kerbschlagzähigkeit, Schweißbarkeit, Schweißrissanfälligkeit
Selen (Se)	Zerspanbarkeit (ähnlich wie Schwefel)	Korrosionsbeständigkeit (geringer als Schwefel)
Silizium (Si)	Zugfestigkeit, Dehngrenze, Korrosionsbeständigkeit, Säurebeständigkeit ab 12% Si	Bruchdehnung, Schweißbarkeit, Zerspanbarkeit, Sprödigkeit, elektr. Leitfähigkeit
Stickstoff (N)	Versprödung, Austenitbildung	Alterungsbeständigkeit, Tiefziehbarkeit
Wasserstoff (H)	Alterung durch Versprödung, Zugfestigkeit	Kerbschlagzähigkeit
Zinn (Sn)	Lötbrüchigkeit, Rissanfälligkeit, Seigerungsanfälligkeit	---

Anlage 5: Mechanisierungsgrad bei der Schweißfertigung

Benennung Kurzzeichen	Beispiele	Bewegungs-/Arbeitsabläufe		
		Brenner-/ Werk- stück- führung	Zusatz- vor- schub	Werkstück- handhabung
Handschwei- ßen (manuel- les Schweißen) m		von Hand	von Hand	von Hand
Teil- mechanisches Schweißen t		von Hand	mecha- nisch	von Hand
Voll- mechanisches Schweißen v		mecha- nisch	mecha- nisch	von Hand
Automati- sches Schweißen a		mecha- nisch	mecha- nisch	mechanisch

Anlage 6: Schweißnahtarten nach EN 2553:2014

Sym- bol	Benen- nung	Darstellung	Sym- bol	Benen- nung	Darstellung	Sym- bol	Benen- nung	Darstellung
	Bördelnahht			Stirnflachnaht			Gegenahht	
	I-Naht			DV-Naht (X-Naht)			Flächennaht	
	V-Naht			DHV-Naht (K-Naht)			Schrägnahht	
	HV-Naht			DY-Naht			Falznahht	
	Y-Naht			DU-Naht			Auftragnahht	
	HY-Naht			DHU-Naht (Doppel-Jot-Naht)			Punktnahht	
	U-Naht			Steifflankenahht			Lochnahht	
	HU-Naht (Jot-Naht)			V-Naht mit Gegenahht			Linienahht	
	Kehlnahht			Doppel-Kehlnahht				

[illegible]

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Vorname Nachname